



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS
“Francisco García Salinas”

Unidad Académica de Ciencias Químicas
Maestría en Ciencia y Tecnología Química

TESIS

**“Efecto de la Radiación UV en la química del deshidratado de fresa
mediante un secador solar directo”**

Para Obtener el Grado de
Maestro en Ciencia y Tecnología Química

Presenta:
I.Q. Joshua Salvador Cabrera Reques

Director:
Dr. Juan Manuel García González

Co-Director:
Dra. María de los Ángeles Hernández Ruiz

Asesor externo:
Dr. David Riveros Rosas

Octubre 2025

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación, se realizó en el Laboratorio de Inocuidad en Investigación de alimentos de Nutrición de la Licenciatura en Nutrición perteneciente a la Unidad Académica de Ciencias de la Salud a cargo del Dr. José Carranza Concha y en el Laboratorio de Solarimétrica y Secado Solar perteneciente a la Unidad Académica de Ciencias Químicas a cargo del Dr. Juan Manuel García González, de la Universidad Autónoma de Zacatecas, contando con los apoyos financieros otorgados por la Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación a través de la beca de maestría con registro No. 1314322.

Al Dr. en C. José Carranza Concha por el asesoramiento y la disponibilidad de su laboratorio para realizar parte de la experimentación y poder hacer posible este proyecto.

Al Dr. Octavio García Valladares, el Dr. Alfredo Domínguez Niño y la Dra. Paulina Guillen Velázquez por recibirme durante mi estancia en el IER, por todo el apoyo y conocimientos brindados.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. en C. Juan Manuel García González por su tiempo dedicado, orientación y consejo, y por haberme brindado la oportunidad de formar parte de este proyecto.

A mis coasesores de Tesis que prestaron de su tiempo para guiarme y enseñarme nuevas cosas durante su elaboración a la Dra. Ángeles Hernández Ruiz y al Dr. David Riveros Rosas.

Contenido

LISTA DE TABLAS	IV
LISTA DE FIGURAS	V
ABREVIATURAS	VIII
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 Fundamentos de la radiación solar	6
2.1.1 Radiación solar extraterrestre	6
2.1.2 Radiación solar terrestre	8
2.1.3 Radiación solar en México	10
2.1.4 Radiación UV en Zacatecas	11
2.2 Principios y tecnologías del secado solar de alimentos	12
2.2.1 Fundamentos del secado solar de alimentos	12
2.2.2 Efecto de la radiación solar y la temperatura en el proceso de secado	13
2.2.3 Propiedades del producto húmedo	16
2.2.4 Secadores solares directos	17
2.3 Parámetros de calidad del producto deshidratado	18
2.3.1 Colorimetría (espacio de color CIELAB).....	18
2.3.2 Actividad de agua (A_w).....	20
2.4 Cinéticas y modelado del proceso de secado.....	21
2.4.1 Cinética de secado	21
2.4.2 Modelos matemáticos de las cinéticas de secado	22
2.5 Composición y valor nutricional de la fresa	24

2.5.1	La fresa	24
2.5.2	Valor nutricional	25
2.5.3	Compuestos bioactivos de la fresa.....	26
2.6	Contexto productivo y aprovechamiento de la fresa en México	27
2.6.1	Producción de fresa en México.....	27
2.6.2	Desperdicio nacional de fresa	28
2.6.3	Usos de la fresa deshidratada en México	29
2.7	Estudios previos del secado solar de frutas	31
2.7.1	Estado de Zacatecas	31
2.7.2	Nivel Nacional	32
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	35
4.	JUSTIFICACIÓN.....	36
4.1	Impacto social.....	37
5.	HIPÓTESIS	37
6.	OBJETIVO GENERAL	37
6.1	Objetivos específicos	38
7.	MATERIALES Y MÉTODOS	39
7.1	Reactivos	39
7.2	Determinación de las propiedades fisicoquímicas de la fresa	39
7.3	Cuantificación de fenoles totales, antocianinas y ácido ascórbico.....	41
7.4	Preparación de los secadores y muestras de fresa para el deshidratado	45
7.5	Obtención de la cinética de secado	48
7.6	Ajuste de la curva de secado a un modelo analítico.....	48
7.7	Evaluación de la radiación UV dentro de los secadores solares	49
7.8	Evaluación de la radiación UV exterior	49

7.9	Análisis Estadístico	49
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
8.1	Determinación de las propiedades fisicoquímicas de la fresa	51
8.2	Cuantificación de fenoles totales, antocianinas y ácido ascórbico.....	57
8.3	Obtención de la cinética de secado	69
8.4	Ajuste de la curva de secado a un modelo analítico.....	81
8.5	Evaluación de la radiación UV dentro de los secadores solares	84
	CONCLUSIONES	89
	PERSPECTIVAS	90
	REFERENCIAS.....	91
	ANEXOS	99

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Transmitancia de UVB de 300 nm y bandas UVA de los materiales en verano e invierno a las 8 y 12 horas solares	18
Tabla 2. Composición de las fresas por 100g	25
Tabla 3. Volumen de desperdicio semanal de frutas.	28
Tabla 4. Análisis económico de los desperdicios de frutas.	29
Tabla 5. Investigaciones de deshidratado de frutas.	31
Tabla 6. Instrumentos de medición.	47
Tabla 7. Modelos analíticos de ajuste de datos.	48
Tabla 8. Humedad inicial de la fresa.	51
Tabla 9. Actividad de agua de las fresas frescas y deshidratadas en agosto del 2024 y en febrero del 2025.	52
Tabla 10. Índice promedio de coloración de las fresas (agosto del 2024).	53
Tabla 11. Índice promedio de coloración de las fresas (febrero del 2025).	53
Tabla 12. Cambio total de coloración de la fresa (agosto del 2024).	54
Tabla 13. Cambio total de coloración de la fresa (febrero del 2025).	55
Tabla 14. Contenido de fenoles totales, antocianinas totales y ácido ascórbico promedio de la fresa fresca.	58
Tabla 15. Temperatura interna de los secadores solares (agosto del 2024).	73
Tabla 16. Temperatura interna de los secadores solares (febrero del 2025).	78
Tabla 17. Parámetros de ajuste de modelos analíticos y coeficiente de determinación (agosto del 2024).	82
Tabla 18. Parámetros de ajuste de modelos analíticos y coeficiente de determinación (febrero del 2025).	83
Tabla 19. Radiación UV dentro de los secadores solares (agosto del 2024).	85
Tabla 20. Radiación UV dentro de los secadores solares (febrero del 2025).	87
Tabla 21. Fenoles totales, antocianinas y ácido ascórbico para la fresa fresca deshidratada (agosto 2024)	99
Tabla 22. Fenoles totales, antocianinas y ácido ascórbico para la fresa fresca deshidratada (febrero 2025)	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución del consumo de calor en diferentes procesos.	3
Figura 2. Tendencias de publicación en el secado de alimentos desde el año 2000-2019.....	4
Figura 3. Reacción de fusión nuclear en el Sol.....	6
Figura 4. Espectro de la radiación solar en la atmósfera y a nivel del mar	7
Figura 5. Variación de la dirección de los rayos del Sol en la Tierra en diferentes épocas del año.....	8
Figura 6. Tipos de radiación.	10
Figura 7. Radiación directa normal en México.....	10
Figura 8. Radiación UVB del año 2019 en la ciudad de Zacatecas.....	11
Figura 9. Radiación UVB promedio en el periodo del 1 de enero al 1 de diciembre, 2019.	12
Figura 10. Transferencia de agua en sólido al aire (Elaboración propia).	12
Figura 11. Estructura espacial de la vitamina C	14
Figura 12. Esquema de oxidación del ácido L-ascórbico.	14
Figura 13. Estructura química de los principales grupos de fenoles.	15
Figura 14. Esquema de oxidación de los grupos -OH de los polifenoles	15
Figura 15. Clasificación de secadores solares	17
Figura 16. Espacio de color CIELAB.....	19
Figura 17. Relación entre reacciones bioquímicas, cambios en la textura del alimento y a_w	20
Figura 18. Curvas de secado: a) Contenido de humedad respecto al tiempo, b) velocidad de secado respecto al tiempo y c) Velocidad de secado respecto contenido de humedad	21
Figura 19. Formas más comunes de los frutos de fresa.	24
Figura 20. Principales exportadores mundiales de fresa en 2016.....	27
Figura 21. Presentaciones de fresa deshidratada en DeFRUT.....	30
Figura 22. Analizador de humedad OHAUS.	39
Figura 23. Medidor de a_w Power TX	40
Figura 24. Colorímetro TPM	40
Figura 25. Mecanismo de acción del reactivo de Folin-Ciocalteu.	41
Figura 26. Esquema de interconversión estructural de antocianinas dependiente del pH.	42

Figura 27. Esquema de reacción de oxidación del ácido ascórbico.....	43
Figura 28. Diseño de los secadores directos y ventilador utilizado.....	45
Figura 29. Secador de aire caliente Hamilton Beach.....	46
Figura 30. Secador por aire caliente con termómetros en cada bandeja.....	46
Figura 31. Estación Solarimétrica de Zacatecas.	47
Figura 32. Cambio de color de las fresas deshidratadas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025..	56
Figura 33. Comparación del ΔE para ambos periodos de experimentación.	57
Figura 34. Curva de calibración para CFT	57
Figura 35. Comparación del contenido fenólico total de las fresas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025..	60
Figura 36. Contenido fenólico total de fresas deshidratadas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025..	61
Figura 37. Comparación del contenido fenólico total para ambos periodos de experimentación.....	63
Figura 38. Comparación de las antocianinas totales en las fresas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025.	64
Figura 39. Antocianinas totales en las fresas deshidratadas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025..	65
Figura 40. Antocianinas totales para ambos periodos de experimentación.....	66
Figura 41. Comparación del ácido ascórbico en las fresas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025..	67
Figura 42. Contenido de ácido ascórbico en las fresas deshidratadas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025.....	68
Figura 43. Comparación del ácido ascórbico para ambos periodos de experimentación.	69
Figura 44. Disminución de masa de las fresas (agosto del 2024).....	70
Figura 45. Disminución de humedad de las fresas (agosto del 2024).	71
Figura 46. Velocidad de secado de las fresas respecto al tiempo y X_{bs} (agosto del 2024). ..	72
Figura 47. Comportamiento de temperatura interna de los secadores solares (agosto 2024).	74
Figura 48. Disminución de masa de las fresas (febrero del 2025).....	75

Figura 49. Disminución de humedad de las rodajas de fresa (febrero del 2025).	76
Figura 50. Velocidad de secado de las fresas respecto al tiempo y X_{bs} (febrero del 2025). .	77
Figura 51. Comportamiento de temperatura interna de los secadores solares (febrero 2025).	79
Figura 52. Temperatura interna en las bandejas del secador por aire caliente.....	80
Figura 53. Comportamiento de la radiación UV en el interior de los secadores solares durante el periodo de verano (agosto 2024).....	86
Figura 54. Comportamiento de la radiación UV en el interior de los secadores solares durante el periodo de verano (febrero 2025)	87
Figura 55. Modelo de ajuste de Weibull para los secadores de agosto del 2024.	101
Figura 56. Modelo de ajuste de Weibull para los secadores de febrero del 2025.....	102

ABREVIATURAS

°C	Grado centígrado
AA	Ácido ascórbico
AT	Antocianinas totales
A _w	Actividad de agua
b.h	Base seca
b.s	Base Húmeda
C3GE	Equivalente de cianidina-3-glucósido
CA	Contenido de antocianinas
CF	Convección forzada
CFT	Contenido fenólico total
cm	Centímetros
CN	Convección natural
DCPID	2, 6 diclorofenol indofenol
EtOH	Etanol
g	Gramo
G	Irradiancia
GAE	Equivalente de ácido gálico
Gd	Irradiancia difusa
gds	Gramos de sólido seco
Gg	Irradiancia global
Go	Irradiancia directa
H	Irradiación por día
h	Hora
H ₂ O	Agua
HCl	Ácido clorhídrico
He	Helio
HPO ₃	Ácido metafosfórico
I	Irradiación por hora
J	Joule
k	Constante de velocidad de secado
Kg	Kilogramo
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt por hora
L	Litro
m ²	Metro cuadrado
MED	Dosis eritemática mínima
MeV	Mega electronvoltio
mg	Miligramo
min	Minuto
MJ	Mega Joule
mL	Mililitro
MR	Relación de humedad
MWh	Mega watt por hora

n	Parámetro de ajuste
NaF	Fluoruro de sodio
NaHCO ₃	Bicarbonato de sodio
nm	Nanómetro
ppm	Partes por millón
rpm	Revoluciones por minuto
ss	Sólidos secos
t	Tiempo
UV	Ultravioleta
UVA	Ultravioleta tipo A
UVB	Ultravioleta tipo B
UVC	Ultravioleta tipo C
W	Watts
Xbh	Humedad en base seca
Xbs	Humedad en base húmeda
μL	Microlitro
μm	Micrómetro

RESUMEN

La fresa es de gran importancia en México debido a que es uno de los países a nivel mundial que más exporta este producto en el mercado internacional. Al ser un fruto altamente perecedero, su disponibilidad se limita a no más de una semana a condiciones ambiente. Adicionalmente, su exposición directa a la radiación solar compromete su calidad nutricional y funcional por la radiación UV. En este contexto, para incrementar su periodo de vida de anaquel y conservar sus compuestos bioactivos, el presente trabajo propone su deshidratación con diferentes secadores solares directos de acrílico y policarbonato transparente que bloquean parcialmente la radiación UV.

El trabajo experimental se llevó a cabo en laboratorio de Solarimétrica y Secado Solar del Campus UAZ con fresas seleccionadas, lavadas, desinfectadas y cortadas en rodajas. Se determinaron las propiedades fisicoquímicas (color, humedad y actividad del agua) y compuestos bioactivos (contenido fenólico total, antocianinas totales y ácido ascórbico) antes y después del deshidratado. Los secadores usados fueron: secador por aire caliente, secadores solares de acrílico y policarbonato por convección natural y forzada, registrando temperatura y radiación UV interna (excepto en el de aire caliente). En agosto del 2024, el secador solar de policarbonato por convección forzada logró una mayor conservación de los compuestos bioactivos (fenoles totales 148.8 mg GAE/100 g_{ss}, antocianinas totales 51.67 mg C3GE/100 g_{ss} y ácido ascórbico 40.24 mg AA/100 g_{ss}), menor cambio de color ($\Delta E = 14.35$), tiempo de secado más corto (5 h) y baja transmitancia de radiación UV (0.0265 W/m²). Por el contrario, para el periodo de febrero el mejor desempeño del secador fue para el de aire caliente con un tiempo de 5.5 h, mayor contenido de fenoles totales (170.7 mg GAE /100 g_{ss}), mejor conservación de antocianinas totales (28.25 mg C3GE/100 g_{ss}) y ácido ascórbico (31.79 mg AA/100 g_{ss}). El menor ΔE (13.41) se observó en el secador solar de policarbonato por convección forzada. El modelo de Weibull fue el más consistente en el ajuste de las cinéticas de secado experimentales, con una R² de 0.99 para todos los secadores en ambos periodos de experimentación. Los secadores solares de policarbonato por convección forzada, muestran una mayor conservación de compuestos bioactivos en la fresa deshidratada en condiciones óptimas de radiación solar y temperatura como en agosto. No obstante, deben optimizarse para conseguir temperaturas y tasas de secado más altas en el periodo invernal, evitando la degradación de sus compuestos bioactivos y una menor alteración de su color.

ABSTRACT

Strawberries are of great importance in Mexico since it is one of the countries worldwide that exports this product the most in the international market. Being a highly perishable fruit, its availability is limited to no more than one week under ambient conditions. Additionally, its direct exposure to solar radiation compromises its nutritional and functional quality due to UV radiation. In this context, to increase its shelf life and preserve its bioactive compounds, the present work proposes its dehydration with different direct solar dryers made of acrylic and transparent polycarbonate that partially block UV radiation.

The experimental work was carried out in the Solarimetry and Solar Drying laboratory of the UAZ Campus with selected strawberries, washed, disinfected, and cut into slices. The physicochemical properties (color, moisture, and water activity) and bioactive compounds (total phenolic content, total anthocyanins, and ascorbic acid) were determined before and after dehydration. The dryers used were: hot air dryer, solar dryers of acrylic and polycarbonate by natural and forced convection, recording temperature and internal UV radiation (except in the hot air dryer). In August 2024, the polycarbonate solar dryer by forced convection achieved greater preservation of bioactive compounds (total phenols 148.8 mg GAE/100 g_{dm}, total anthocyanins 51.67 mg C3GE/100 g_{dm}, and ascorbic acid 40.24 mg AA/100 g_{dm}), less color change ($\Delta E = 14.35$), shorter drying time (5 h), and low UV radiation transmittance (0.0265 W/m²). On the other hand, for the February period, the best dryer performance was for the hot air dryer with a time of 5.5 h, higher total phenol content (170.7 mg GAE/100 g_{dm}), better preservation of total anthocyanins (28.25 mg C3GE/100 g_{dm}) and ascorbic acid (31.79 mg AA/100 g_{dm}). The lowest ΔE (13.41) was observed in the polycarbonate solar dryer by forced convection. The Weibull model was the most consistent in fitting the experimental drying kinetics, with an R^2 of 0.99 for all dryers in both experimental periods. The polycarbonate solar dryers by forced convection show greater preservation of bioactive compounds in dehydrated strawberries under optimal solar radiation and temperature conditions such as in August. However, they must be optimized to achieve higher temperatures and drying rates in the winter period, avoiding the degradation of their bioactive compounds and a lower alteration of their color.

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo se pierde aproximadamente el 30% de los alimentos que se consumen según la Organización para la Alimentación y Agricultura debido a su poca durabilidad o daño durante su transporte. La mayoría de los productos vegetales tiene una composición del 80% de agua el cual implica un gasto energético de 9 MJ para producir 1 kg de producto seco y evitar su desperdicio, por lo que su demanda de energía es de 3.57 kWh/kg de producto seco (Messina et al., 2022).

La industria alimenticia consume alrededor del 30% de la energía que se produce en el mundo. Se estima que el 74% de la energía consumida, por parte de las industrias, está destinada a la demanda de calor de los procesos donde la mayoría dependen del uso de combustibles fósiles para la producción de su energía requerida. Esto contribuye globalmente con un 35% de emisiones de los gases de efecto invernadero (Ortiz-Rodríguez et al., 2022).

En la industria alimentaria de México, se requieren aproximadamente 40 millones de MWh/año de demanda energética en forma de calor y electricidad (Sanchez & Torres, 2020) generador por fuentes de combustible fósil. En la **Figura 1** se observa que el 10% de esa energía consumida es utilizada en el proceso de “otros” que se incluye al deshidratado y secado de productos alimenticios.

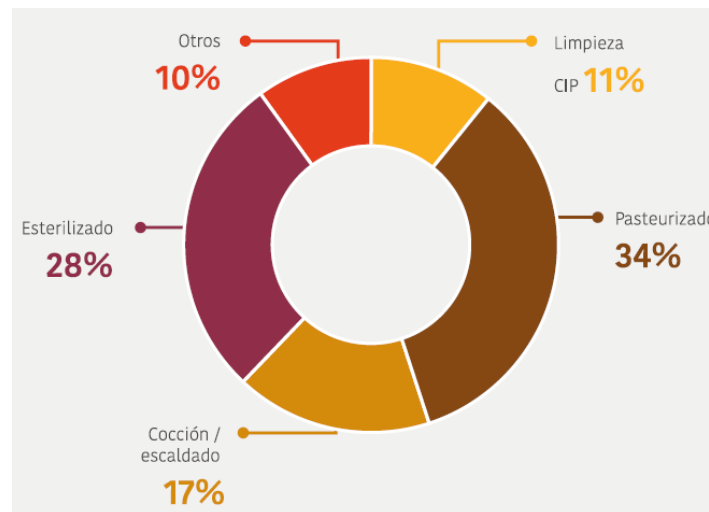


Figura 1. Distribución del consumo de calor en diferentes procesos (Sanchez & Torres, 2020).

Debido a esta problemática, las investigaciones sobre la innovación de los sistemas solares para contribuir a la reducción del uso de energías no renovables en los últimos años ha ido en aumento como se muestra en la **Figura 2** (Menon et al., 2020).

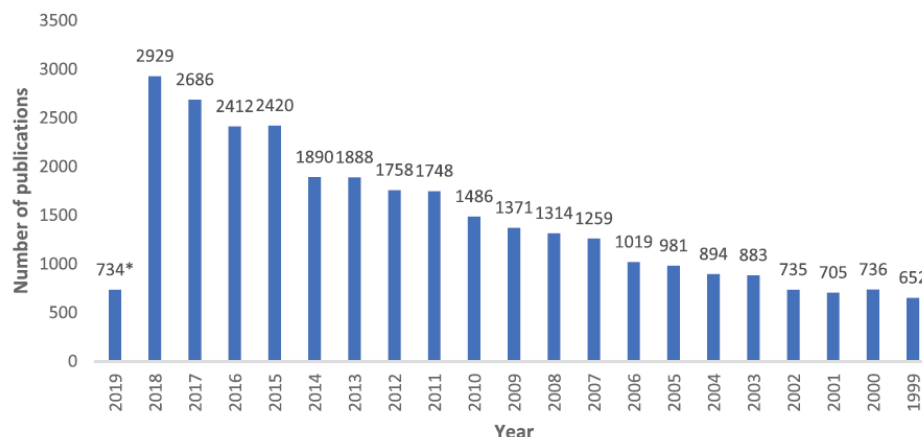


Figura 2. Tendencias de publicación en el secado de alimentos desde el año 2000-2019 (Menon et al., 2020).

Otro aspecto importante que se debe de tomar en cuenta es la huella hídrica de los alimentos que son frescos, pues el deshecho de 5 kg de este producto conlleva al desperdicio de 7,500 litros de agua dulce (Nair et al., 2020). Por este motivo, los deshidratadores solares son una fuente de energía alternativa para el deshidratado de alimentos, son sostenibles, pero deben de mejorar sus eficiencias de secado para producir altas cantidades de productos de buena calidad y en tiempos cortos (Roratto et al., 2021).

Hacer uso de la energía solar en el sector alimenticio presenta grandes ventajas como la reducción de combustibles fósiles para la producción de energía térmica y emplearla en el deshidratado. Otras ventajas y desventajas en el deshidratado solar se presentan a continuación:

Ventajas

- ❖ Gran variedad de modelos de secadores solares, para satisfacer los parámetros económicos del comprador, así como del volumen que quiera deshidratarse.
- ❖ Brinda oportunidades de autoempleo y generación de ingresos para la familia sin hacer una gran inversión como microempresa (María & Santos, 2020).
- ❖ Largo tiempo de conservación de los alimentos (Mandi et al., 2019).
- ❖ Posibilita el almacenamiento de productos a temperatura ambiente.

- ❖ Disminuye el peso y el volumen del producto reduciendo costos de empaque, almacenamiento y transporte.
- ❖ Reduce la producción de residuos.
- ❖ Disponibilidad constante del producto a lo largo del periodo de conservación, a precios estables.
- ❖ En algunos casos mejora las propiedades organolépticas, como el sabor, el olor y la textura.
- ❖ Eleva el valor agregado.
- ❖ Menos tiempo de secado.
- ❖ Aumenta la compatibilidad con otros alimentos en mezclas secas.
- ❖ Reduce la producción de residuos.
- ❖ Facilita el uso del producto (leche en polvo, café soluble, etc.) (Octavio García Valladares & Figueroa, 2017).

Desventajas

- ❖ En la industria de frutas y hortalizas deshidratadas se tiene una limitación de uso debido a la poca disponibilidad de maquinaria (Azimova & Glushenkova, 2021).
- ❖ Dificulta una completa rehidratación (según el método y condiciones).
- ❖ Modifica el sabor, olor, color y textura en algunos productos.
- ❖ Algunos métodos de deshidratación tienen costos relativamente altos (Octavio García Valladares & Figueroa, 2017).
- ❖ En el deshidratado al aire libre, se puede tener contaminación por insectos, roedores o excrementos de pájaros (S. Rehman & Rubab, 2020).
- ❖ Los días nublados dificultan el proceso de deshidratado.

Además de estas desventajas, se debe de cuidar la temperatura interna en las cámaras de secado, si se exceden los 60-70°C puede llegar a afectar la calidad del fruto como el olor, color, sabor (Rodríguez-Ramírez et al., 2021). El oscurecimiento enzimático o no enzimático, es causado por las altas temperaturas que se pueden llegar a tener durante el secado solar, sin embargo, la exposición directa a radiación UV provoca pérdidas de nutrientes en los alimentos (López-Ortiz et al., 2021).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentos de la radiación solar

2.1.1 Radiación solar extraterrestre

El Sol es responsable de la vida en la tierra gracias a la energía que se genera en su núcleo por reacciones de fusión nuclear. En cada una de ellas se fusionan 4 núcleos de hidrógeno (H) para producir 1 núcleo de helio (He) además de 2 positrones y 26 MeV de energía radiante (ver **Figura 3**). Las múltiples reacciones de fusión de H liberan grandes cantidades de energía electromagnética que, después de diversos procesos de transferencia de calor, es emitida en la fotosfera para llegar finalmente a la Tierra. Esta radiación produce la mayor parte de los fenómenos climáticos y es la principal fuente de energía de los seres vivos de la superficie (Octavio García Valladares & Figueroa, 2017).

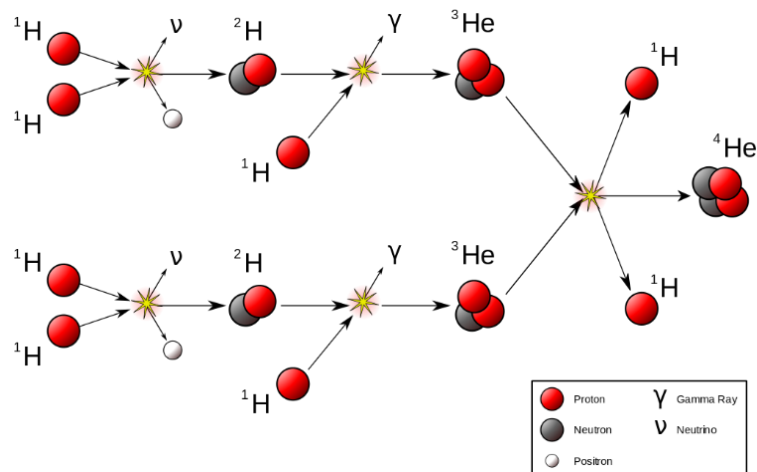


Figura 3. Reacción de fusión nuclear en el Sol (Kaya, 2021).

La radiación que se recibe el tope de la atmósfera por unidad de área es casi una constante, puede variar durante el año principalmente por órbita elíptica de la Tierra respecto al Sol. La irradiancia solar fuera de la atmósfera a una unidad astronómica se le conoce como constante solar y tiene un valor actual aproximado de $1360.8 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$. La distribución espectral de la radiación solar fuera de la atmósfera, se asemeja a la de un cuerpo negro (**Figura 4**), pero conforme atraviesa la atmósfera las partículas presentes absorben gran parte de esta radiación (Octavio García Valladares & Figueroa, 2017). De esta energía recibida, el 97% se encuentra

en una longitud de onda entre los 0.2 a 0.3 μm , de la cual el 9% pertenece a la ultravioleta, 40% de luz visible y el 51% de infrarroja (Vazquez, 2023).

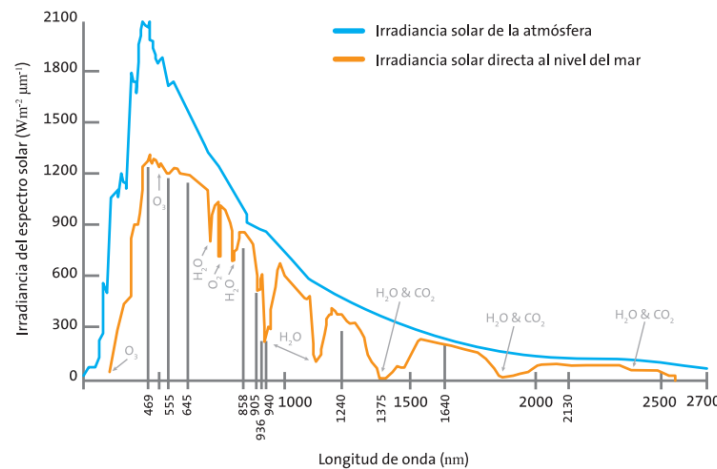


Figura 4. Espectro de la radiación solar en la atmósfera y a nivel del mar (Octavio Garcia Valladares & Figueroa, 2017).

A continuación, se definen conceptos utilizados en el área de energía solar y que serán útiles en el desarrollo del presente trabajo:

Irradiancia: es la potencia por unidad de área definida con la letra G , G_o para la irradiancia extraterrestre, G_b para la irradiancia directa, G_d para la irradiancia difusa y G_g para la irradiancia global (suma de la proyección de la radiación directa horizontal y la radiación difusa), sus unidades son W/m^2 .

Irradiación: es la cantidad de energía que se recibe por unidad de área, se define con la letra I para la irradiación por hora, H para la irradiación por día, de manera similar con los subíndices o , b y d (extraterrestre, directa y difusa) para indicar de cual se está hablando, sus unidades son J/m^2 o kWh/m^2 (Octavio Garcia Valladares & Figueroa, 2017).

Radiación Ultravioleta (UV): Es la parte de la radiación solar que se encuentra en una región que va de los 100 a los 400 nm de longitud de onda y se divide de 3 componentes:

- 🌈 UVA de 415-315 nm
- 🌈 UVB de 315-280 nm
- 🌈 UVC 280-100 nm

A medida que la luz UV atraviesa la atmósfera, el 90% aproximadamente de radiación UVB y toda la radiación UVC es absorbida por los gases presentes (principalmente oxígeno O₂ y ozono O₃), de manera que la radiación que llega a la superficie de la Tierra se encuentra compuesta por radiación UVA y un poco de UVB siendo esta última dañina para las personas y el medio ambiente.

La unidad de medida de la radiación UVB es el MED (Dosis Eritémica Mínima), el cual representa la cantidad de energía que se requiere para provocar enrojecimiento en una piel tipo 2 (piel clara según la escala de Fitzpatrick). La intensidad de la radiación que se recibe a cada instante se mide en unidades de MED/h (Med-hora) que expresa la cantidad de MEDs que se recibe en una hora. El MED/h tiene equivalencia en unidades de irradiancia y se obtiene con la siguiente expresión:

$$1 \text{ MED/h} = \frac{1 \text{ MED}}{1\text{h}} = \frac{210 \text{ J/m}^2}{3600 \text{ s}} = 0.583 \text{ W/m}^2 \quad (1)$$

2.1.2 Radiación solar terrestre

La Tierra gira alrededor del Sol en órbita elíptica con una duración aproximada de 365.25 días (traslación) y a su vez gira sobre su propio eje con una duración de 24 horas (rotación) originando el día y la noche, este eje de la tierra se encuentra desplazado 23°26' 13.7" sobre el plano de la órbita. Debido al movimiento de la tierra alrededor del Sol y sobre su propio eje depende de la cantidad de energía que recibimos de este, como se observa en la **Figura 5**, en el solsticio de diciembre (invierno) los rayos del Sol caen perpendicularmente sobre el trópico de Capricornio y en el solsticio de junio (verano) sobre el trópico de Cáncer (Octavio García Valladares & Figueroa, 2017).

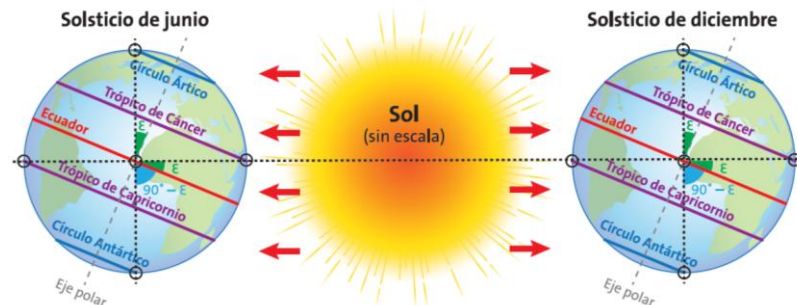


Figura 5. Variación de la dirección de los rayos del Sol en la Tierra en diferentes épocas del año (Octavio García Valladares & Figueroa, 2017).

La cantidad de radiación solar que la tierra recibe del Sol depende de muchos factores como:

- ✚ La posición de la Tierra respecto al Sol, ya que gira alrededor de él en forma elíptica en un tiempo de 365.25 días, dependiendo del día del año en que nos encontremos tendremos una distancia respecto al Sol, la distancia más larga se tiene en el solsticio de verano, de forma contraria, la distancia más corta ocurre en el solsticio de invierno.
- ✚ Conforme la radiación solar atraviesa nuestra atmósfera, los gases presentes en la atmósfera (principalmente oxígeno y nitrógeno) cambian la dirección de la radiación, dispersándose en mayor porcentaje entre más pequeña sea la longitud de onda (color azul del cielo) y parte de la radiación dispersada es devuelta al espacio. También las nubes presentes pueden bloquear y reflejar gran cantidad de radiación dependiendo de su espesor (Octavio García Valladares & Figueroa, 2017).

Mencionado anteriormente, la radiación proveniente del Sol que recibe la Tierra, sufre diversos cambios conforme atraviesa la atmósfera hasta llegar a la superficie de la Tierra. Al llegar a la superficie, la radiación solar se mide de forma integral en todas sus longitudes de onda en tres componentes:

- ✚ **Radiación directa:** es la irradiancia solar que se recibe desde el disco solar en el cielo y su región circumsolar. Esta radiación logró pasar la atmósfera casi sin cambios en su dirección de propagación.
- ✚ **Radiación difusa:** procede de todo el cielo a excepción de la componente de radiación directa, es decir, es la que se recibe desde toda la bóveda celeste después de haber sido desviada por la atmósfera.
- ✚ **Radiación Global:** es la suma de la radiación directa (proyectada sobre una superficie horizontal) y difusa (Duffie & Beckman, 2020).

En la **Figura 6** se puede observar los diferentes tipos de radiación provenientes del Sol.

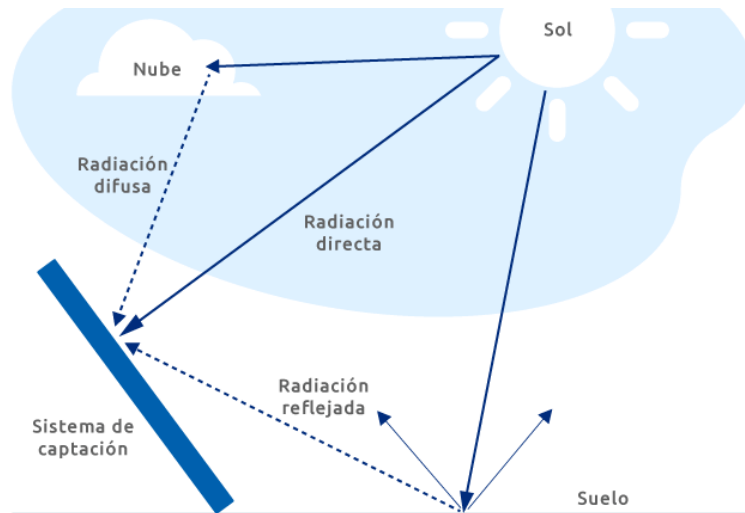


Figura 6. Tipos de radiación (Octavio García Valladares & Figueroa, 2017).

2.1.3 Radiación solar en México

México se encuentra en una zona privilegiada ya que recibe diariamente un promedio de 5.5 kW/m^2 (Octavio García Valladares & Figueroa, 2017). En la **Figura 7** se observa el mapa de México de la radiación solar diaria promedio anual elaborado por el Servicio Solarimétrico Mexicano del Instituto de Geofísica de la UNAM.

Se puede observar que la parte central del país con una gran radiación solar diaria con valores entre los 6.75 y 8.62 kW/m^2 (Barrón, 2018).

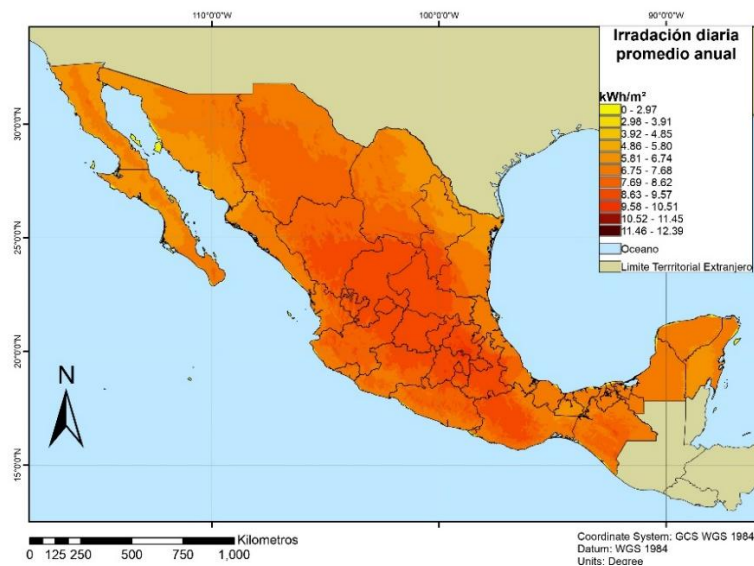


Figura 7. Radiación directa normal en México (Barrón, 2018).

Según el mapa de la radiación solar diaria anual en México, Zacatecas recibe entre 6.75 y 7.68 kWh/m²día de radiación directa equivalentes 511 W/m² de irradiancia directa en promedio. Sin embargo, los estudios de deshidratado como plátano, piña, kiwi, entre otros, por parte de la Universidad Autónoma de Zacatecas del programa de Ingeniería Química han registrado mediciones de irradiancia directa de hasta 570 W/m² superando su promedio establecido (Del Rio Félix et al., 2019).

2.1.4 Radiación UV en Zacatecas

La ciudad de Zacatecas es favorecida por el recurso solar para su aprovechamiento, sin embargo, se realizó un estudio en el año 2019 por parte de Frías Hernández y colaboradores del índice UV mediante los datos de la estación Solarimétrica del campus UAZ siglo XXI. De la información publicada en el artículo, se cambió el índice UV a W/m² de los datos reportados para una mayor comprensión como se maneja en la radiación solar recibida. Los meses de abril y mayo fueron los que tuvieron los valores más altos de radiación UVB de 0.25 W/m² aproximadamente (**Figura 8**).

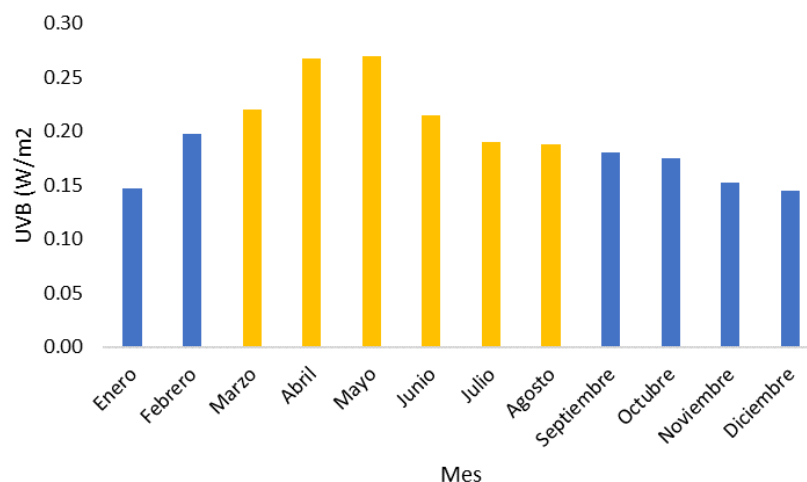


Figura 8. Radiación UVB del año 2019 en la ciudad de Zacatecas (Frías-Hernández et al., 2022).

La mayor intensidad de la radiación UVB se encuentra de las 10 am a las 3 pm del día y su valor máximo lo alcanza al medio día con un valor de cercano a los 0.2 W/m² como se observa

en la **Figura 9**. Por ello, durante el secado solar directo de alimentos es importante contar con cubiertas que bloqueen la mayor parte de la radiación UV recibida con la finalidad de preservar el contenido nutricional y los parámetros fisicoquímicos del producto final (Komonsing et al., 2022).

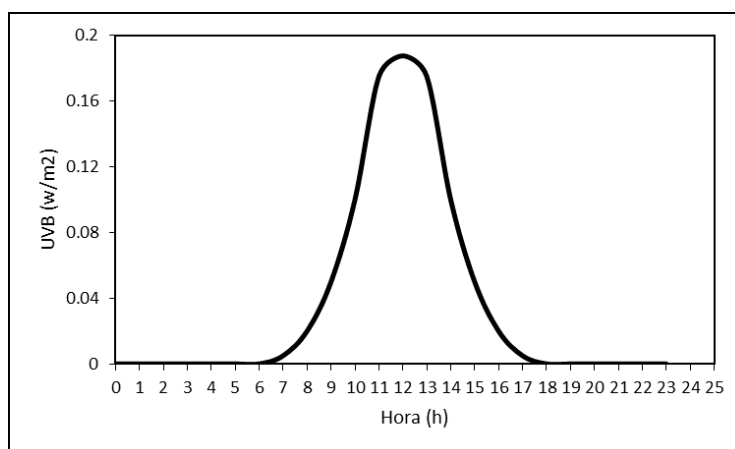


Figura 9. Radiación UVB promedio en el periodo del 1 de enero al 1 de diciembre, 2019 (Frías Hernández et al., 2022).

2.2 Principios y tecnologías del secado solar de alimentos

2.2.1 Fundamentos del secado solar de alimentos

El secado solar de alimentos es uno de los métodos más antiguos para su preservación, pues el agua contenida en el sólido se transfiere a una fase gas (aire) como se muestra en la **Figura 10**. Al reducir su contenido de agua, inhibe el crecimiento de microorganismo causantes de la descomposición del alimento y su corta durabilidad. Actualmente, las tecnologías de secado se consideran operaciones unitarias muy importantes y se encuentran en constante desarrollo para obtener grandes cantidades de producto seco en tiempos cortos.

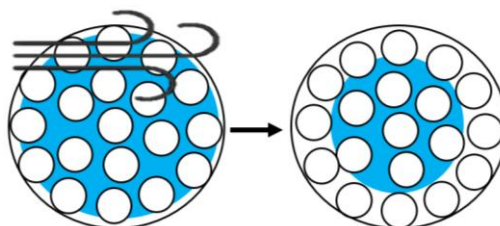


Figura 10. Transferencia de agua en sólido al aire (Elaboración propia).

Durante el secado, se involucran los procesos de transferencia de calor y masa. Inicialmente la transferencia de calor se da desde los alrededores (proveniente de la radiación solar) hacia la superficie del alimento aumentando la temperatura del agua en su interior y su presión de vapor interna. Posteriormente la transferencia de masa se origina cuando el agua interior del alimento viaja a su superficie, la evaporación es seguida por el transporte externo hacia el aire que se encuentra en sus alrededores. Mediante la combinación de estos procesos de transferencia de calor y masa se una humedad de equilibrio donde la evaporación de agua en el alimento es igual al contenido de agua en el ambiente (Bañuelos Mireles et al., 2019).

Sin embargo, la exposición directa al Sol de los alimentos en el secado solar puede tener grandes desventajas al oscurecer su color característico (considerado como un parámetro de calidad), comprometer la composición nutricional o disminuir los compuestos bioactivos presentes que son de gran beneficio para la salud humana (Rodríguez-Ramírez et al., 2021).

2.2.2 Efecto de la radiación solar y la temperatura en el proceso de secado

Debido a la cantidad de radiación UV que llega a la tierra (fuera de su atmósfera) solo representa el 8 y 9% de la radiación total. Sin embargo, es suficiente para romper los enlaces químicos de los compuestos en los alimentos como C-H, C-O, C- (Roy et al., 2024). Acelera la oxidación de los alimentos causando reacciones de fotooxidación generando radicales libres. Las moléculas presentes reaccionan de forma más rápida con el oxígeno promoviendo el deterioro nutricional de los alimentos (Guzman-Puyol et al., 2022).

Por ello, controlar la radiación UV que incide específicamente en las frutas durante su deshidratado es de vital importancia para evitar repercusiones en la calidad del fruto final. Por ejemplo, se puede llegar a la pérdida de vitaminas B y C, alterar el color característico o degradar los nutrimentos que contengan estos alimentos (Tang et al., 2025).

Los compuestos bioactivos de las frutas como las vitaminas, polifenoles, flavonoides o ácidos orgánicos, tienen beneficios en la salud humana ayudando a tratar enfermedades metabólicas o el estrés oxidativo provocado por los radicales libres en las células. Estos compuestos también se pueden ver afectados por el incremento de la temperatura durante el deshidratado

ocasionado por la cantidad de radiación solar que reciben los deshidratadores. A continuación, se muestran los mecanismos de degradación de algunos compuestos bioactivos de las frutas:

Mecanismo de degradación del ácido L-ascórbico (vitamina C)

Es un antioxidante de vital importancia en los seres humanos para la prevención de enfermedades debido a que no puede sintetizarse de forma natural. Es soluble en el agua y al igual que en los seres humanos, es importante en algunos procesos fisiológicos en las plantas como lo es su crecimiento o la fotosíntesis. Su estructura se muestra en la **Figura 11**.

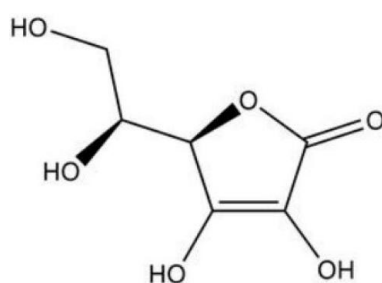


Figura 11. Estructura espacial de la vitamina C (ElGamal et al., 2023).

La vitamina C es sensible a los cambios de temperatura, ante la presencia de oxígeno sufre un proceso de oxidación en donde el ácido L-ascórbico se oxida a L-deshidroascórbico como se observa en la siguiente reacción:

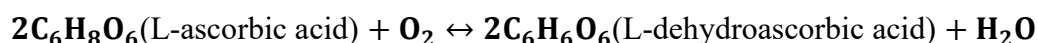


Figura 12. Esquema de oxidación del ácido L-ascórbico (ElGamal et al., 2023).

Mecanismo de degradación de fenoles

Los fenoles son metabolitos presentes en los alimentos que se caracterizan por tener un anillo aromático (benceno) y tener radicales hidroxilos (-OH). Se han identificado 500 tipos de fenoles en los alimentos, clasificándose principalmente en: ácidos fenólicos, flavonoides, estilbenos, taninos y lignanos (Rangani & Ranaweera, 2023). Algunos de los grupos se pueden observar en la **Figura 13**.

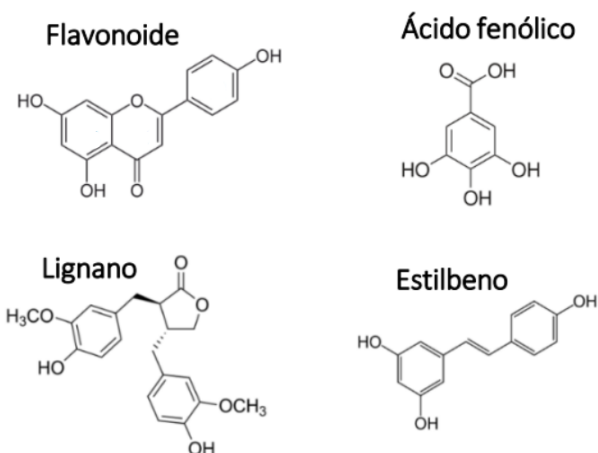


Figura 13. Estructura química de los principales grupos de fenoles (Gutiérrez, 2023).

Ante los procesos térmicos, los grupos -OH de los polifenoles se oxidan a cetonas, aldehídos o grupos carboxilo (Gutiérrez, 2023) como se observa en la **Figura 14**.

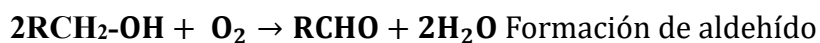
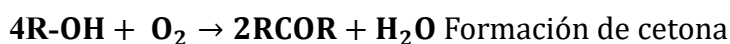


Figura 14. Esquema de oxidación de los grupos -OH de los polifenoles (ElGamal et al., 2023).

Otro caso de los polifenoles son las antocianinas, que son una subclase de los flavonoides, solubles en el agua y otorgan el color característico a los vegetales que puede ser rojo, naranja, azul, morado, dependiendo de su composición estructural y pH (Parra-Palma et al., 2020). Las antocianinas son de vital importancia en las plantas ya que las protegen de la radiación ultravioleta y pueden atraer a insectos para su polinización (Arias, 2023). Las antocianinas monoglucosiladas, es decir, que solo contiene una molécula de azúcar, su deterioro es más fácil en comparación con las antocianinas que contengan más polisacáridos.

Es importante conocer las características del producto húmedo a deshidratar, permite estimar su tiempo de secado para disminuir el riesgo por su exposición directa al Sol para conservar la calidad final del alimento y asegurar una estabilidad microbiológica para su preservación.

2.2.3 Propiedades del producto húmedo

En el secado solar de alimentos, el contenido de humedad de equilibrio en los alimentos en relación con la humedad relativa de equilibrio es de utilidad para estimar los tiempos de secado y la cantidad de energía que se requiere para retirar la humedad de los alimentos.

Contenido de humedad

El contenido de humedad de un producto es el agua contenida en su estructura y puede expresarse en base seca (M) que es la forma más conveniente o en base húmeda (m) para productos agrícolas. La base seca nos indica la cantidad de masa seca que es constante en alimento, con ella nos brinda información del número de veces del contenido de agua comparada con la masa sólida (Vazquez, 2023). Se puede calcular con la ecuación 2:

$$X_{bs} = \frac{W_o - W_f}{W_f} \quad (2)$$

Donde:

X_{bs} es la humedad en base seca, W_o es la masa de la muestra en un tiempo dado y W_f es la masa final de la muestra (Rodríguez-Ramírez et al., 2021).

La base húmeda indica el contenido de humedad del producto respecto a su masa total, se relaciona con la base seca con la ecuación 3:

$$m = \frac{M}{1 + M} \quad (3)$$

Humedad de equilibrio

La humedad de equilibrio es cuando el producto a deshidratar absorbe y libera humedad al aire que se encuentra en los alrededores, por lo que el producto tiene una temperatura y humedad relativa constantes y está en equilibrio con el medio ambiente (Vazquez, 2023).

Por ello, conocer las propiedades del alimento a deshidratar son de importancia, ya que permite diseñar un proceso de secado solar directo eficiente, seleccionar el tipo de secador más adecuado para el alimento según sus características y obtener las mejores eficiencias de los secadores.

2.2.4 Secadores solares directos

Los secadores solares directos (**Figura 15**) son un diseño mejorado del secado al Sol abierto y también son conocidos como integrales, en él se mantienen los productos dentro de una cámara de secado que recibe directamente la radiación solar y que puede estar fabricada de cualquier material transparente como vidrio o plástico (Lingayat et al., 2021). Según el movimiento del aire se clasifican en:

-  **Pasivos:** el aire en su interior circula de manera natural debido al calentamiento que tiene por la energía solar, ayuda a mantener un secado más favorable al minimizar el polvo, insectos o el cambio climático.
-  **Activos:** utilizan equipos de convección forzada para la transferencia de calor mediante el uso de ventiladores, los cuales son ideales para alimentos con altos contenidos de humedad sin la necesidad de alcanzar altas temperaturas de secado. Su principal ventaja es un proceso de secado más rápido obteniendo un producto de calidad al reducir su exposición a la radiación solar (Fernandes & Tavares, 2024).



Figura 15. Clasificación de secadores solares (Octavio García & Figueroa, 2017).

Una de las dificultades que presentan este tipo de secadores, es que la exposición directa al Sol daña al producto, por lo que los materiales transparentes deben de bloquear la radiación ultravioleta. El polietileno tiene una duración de 3 a 4 meses a la exposición de radiación UV y para espesores de 3 mm absorbe de 70-95% de UV. El vidrio filtra un 72% de la radiación UV, pero es pesado y no es resistente a la rotura. El policarbonato es uno de los más utilizados debido a que es resistente y bloquea la radiación UV en un 99%, logrando alcanzar temperaturas de hasta 65°C (Komonsing et al., 2022).

Un estudio realizado por Serrano & Moreno (2020) mostró las transmitancia en las bandas UVA y UVB de diversos materiales como acrílico (plástico comúnmente usado, también conocido como metacrilato), vidrio ahumado y policarbonato que se muestran en la **Tabla 1** para el verano e invierno a distintas horas del día.

Tabla 1. Transmitancia de UVB de 300 nm y bandas UVA de los materiales en verano e invierno a las 8 y 12 horas solares (Serrano & Moreno, 2020).

Material	T-UVB				T-UVA			
	Summer		Winter		Summer		Winter	
	8 h	12 h	8 h	12 h	8 h	12 h	8 h	12 h
Methacrylate	0.56	0.26	0.68	0.47	0.32	0.29	0.33	0.31
Smoked glass	0.56	0.29	0.68	0.49	0.72	0.78	0.72	0.70
Alveolar polycarbonate	0.38	0.16	0.60	0.30	0.08	0.05	0.09	0.06
Polycarbonate	0.30	0.11	0.60	0.28	0.04	0.02	0.10	0.04
Fibreglass	0.71	0.63	0.80	0.66	0.70	0.67	0.70	0.79

El uso de los secadores solares directos es una alternativa sostenible y de acceso para la conservación de los alimentos, sin embargo, el diseño y la eficiencia influye en sus propiedades como el color, humedad o estabilidad de los compuestos bioactivos presentes en el alimento.

2.3 Parámetros de calidad del producto deshidratado

2.3.1 Colorimetría (espacio de color CIELAB)

El espacio de color L^*a^*b o también conocido como CIELAB, es utilizado para evaluar el color de los alimentos. Es un sistema que se encuentra formado por 3 ejes, el eje vertical denominado L y dos ejes horizontales denominados a y b (ver **Figura 16**).

- ✚ **Eje vertical L:** representa la medida de la luminosidad con valores desde cero para el negro y 100 para el blanco.
- ✚ **Eje horizontal a:** representa la medida del contenido de color rojo tomando valores positivos y el contenido de color verde tomando valores negativos.
- ✚ **Eje horizontal b:** es perpendicular al eje a, representa la medida de contenido de color amarillo con valores positivos y el contenido de color azul con valores negativos.

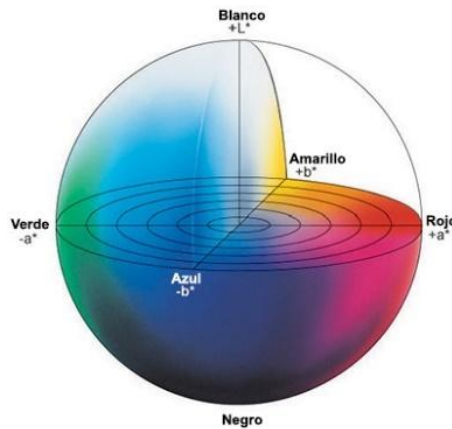


Figura 16. Espacio de color CIELAB (Talens, 2017).

Las diferencias de color es la comparación de la muestra con el estándar o la muestra inicial respecto a la final. Si ΔL es positivo es más luminoso y si es negativo es más oscuro, Δa si es positivo es más rojo y si es negativo es más verde, Δb si es positivo es más amarillo y si es negativo es más azul. La diferencia total de color se denomina como ΔE y se calcula mediante la ecuación 4 (Talens, 2017):

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (4)$$

Saturación cromática: es la intensidad o pureza de un color, mide que tan gris puede llegar a ser un color y se calcula mediante la ecuación 5:

$$C = \sqrt{(a)^2 + (b)^2} \quad (5)$$

Ángulo de tono: se expresa en grados, y define la posición del color en un círculo cromático donde 0° corresponde al rojo puro, 90° al amarillo, 180° al verde, 270° al azul y se calcula mediante la ecuación 6 (Talens, 2017):

$$H = \arctan\left(\frac{a}{b}\right) \quad (6)$$

2.3.2 Actividad de agua (A_w)

El desperdicio de los alimentos postcosecha se debe al crecimiento microbiano relacionado con el contenido de humedad, haciéndolos no aptos para el consumo humano y las técnicas de preservación como el secado solar se presentan como una alternativa. Debido a esto, la humedad final de los alimentos deshidratados es de importancia para poder asegurar su estabilidad microbiológica durante su almacenamiento. Para evitar el crecimiento microbiano en los alimentos deshidratados se requieren humedades por debajo del 10%, sin embargo, se requiere otro parámetro para asegurar la estabilidad microbiológica del alimento como lo es la actividad del agua (A_w). Ambas se encuentran relacionadas mediante isoterma de sorción de humedades y temperaturas dadas, pero su relación es compleja y específica para los alimentos (Vera Zambrano et al., 2019).

La actividad del agua se relaciona matemáticamente como la relación del cociente de la presión parcial del agua contenido en un alimento que está en equilibrio entre la presión parcial del agua pura. Este parámetro indica la cantidad de agua libre de un alimento disponible para participar en reacciones químicas o biológicas y promover el crecimiento de microorganismos. Para un alimento fresco, los valores son entre 0.98-1.00 y en productos secos de <0.6 para asegurar la estabilidad del alimento (**Figura 17**), ya que, es la a_w mínima en la que los microorganismos pueden subsistir (Serrate, 2020).

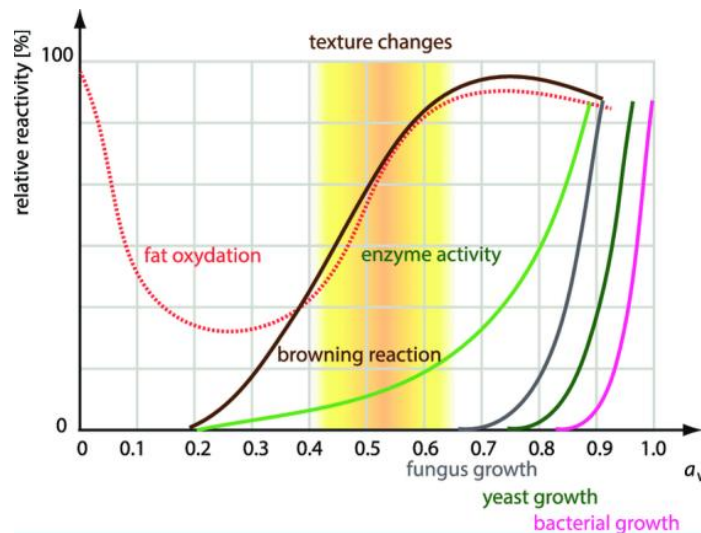


Figura 17. Relación entre reacciones bioquímicas, cambios en la textura del alimento y a_w (Serrate, 2020).

La calidad del alimento deshidratado también se encuentra estrechamente ligada con la forma en que se efectúa el proceso de secado en un tiempo determinado y puede ser descrito mediante los modelos matemáticos. Por esta razón, es importante conocer los modelos matemáticos de ajuste que permitan describir el proceso de pérdida de humedad del alimento, de forma que permita facilitar su diseño y optimización del proceso.

2.4 Cinéticas y modelado del proceso de secado

2.4.1 Cinética de secado

La cinética de secado estudia el contenido de humedad retirado por la evaporación, el tiempo, el consumo de energía, etcétera. (Vazquez, 2023). Si se mide periódicamente el peso del material en función del tiempo y con la masa obtener la humedad o velocidad de secado del producto, se pueden realizar diferentes curvas de secado en función del tiempo como se muestra en la **Figura 18**:

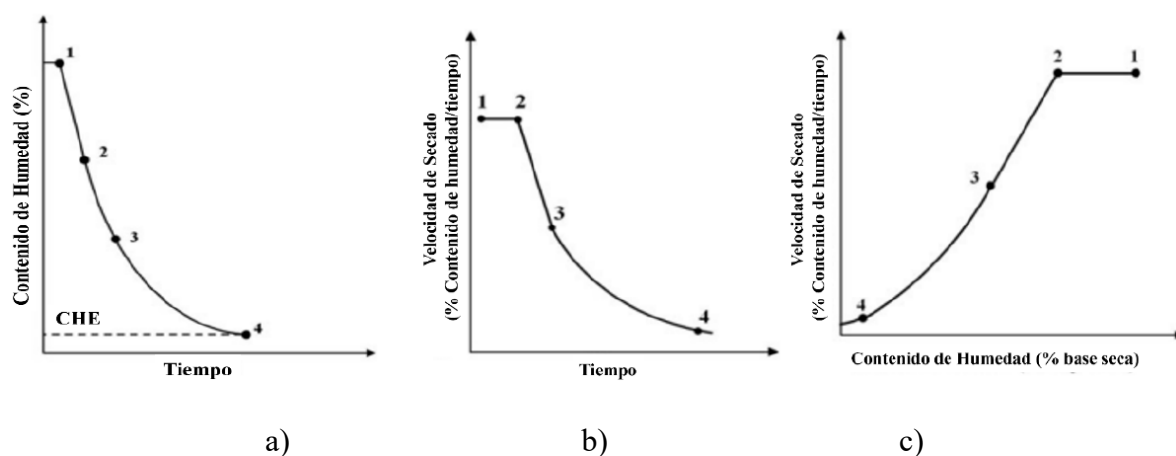


Figura 18. Curvas de secado: a) Contenido de humedad respecto al tiempo, b) velocidad de secado respecto al tiempo y c) Velocidad de secado respecto contenido de humedad (Vazquez, 2023).

En las curvas de secado se tiene un periodo de velocidad constante (1-2) en el que producto se mantiene a la temperatura de bulbo húmedo del aire y la velocidad de secado es proporcional a la velocidad de vaporización del agua. Un periodo de velocidad decreciente (2-3) donde el contenido de humedad del producto alcanza su punto crítico. Finalmente un

segundo periodo de velocidad decreciente (3-4) cuando contenido de humedad del producto sigue en disminución hasta que se alcanza la humedad de equilibrio (Vazquez, 2023).

Dependiendo del tamaño y tipo del producto, varias frutas y verduras se secan en rodajas delgadas o, mejor dicho, capas delgadas, de manera que queden expuestas en su totalidad al aire que las rodea y que este se encuentre en condiciones estables. Para entender los procesos y cinéticas de secado solar de los productos se utilizan diversos modelos y se clasifican en tres categorías: teóricos, los cuales al ignorar los cambios de temperatura, son inexactos en la primera y última etapa del secado; semiteóricos, se derivan de la segunda ley de Fick y solo son apropiados para la temperatura, velocidad de secado y humedad del producto y; empíricos, no toman en cuenta los procesos de transporte de humedad en el producto y ofrecen un adecuado ajuste de los datos experimentales del secado (Janjai & Bala, 2017).

2.4.2 Modelos matemáticos de las cinéticas de secado

2.4.2.1 Modelos en base a la Ley de enfriamiento de Newton

La ley de enfriamiento de Newton establece que la pérdida de calor de un objeto es directamente proporcional a la diferencia de temperatura entre el objeto y sus alrededores. Se describe mediante la ecuación 7:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_m) \quad (7)$$

Donde k es la constante de proporcionalidad, T es la temperatura del objeto y T_m es la temperatura en los alrededores (Vazquez, 2023). De esta ley se derivan modelos importantes como:

Modelo de Page

Se considera como el segundo mejor modelo utilizado en el cual se incluye otra constante.

$$MR = \exp(-kt^n) \quad (8)$$

Donde k es la velocidad de secado y n la constante del modelo (Janjai & Bala, 2017).

Modelo de Page modificado

Es una modificación del modelo de Page, contiene dos constantes y ha sido reconocido como el octavo mejor modelo de secado solar después de Henderson y Pabis.

$$MR = \exp [-(kt)^n] \quad (9)$$

Donde k es la velocidad de secado y n la constante del modelo

2.4.2.2 Modelos en base a la segunda Ley de Fick de difusión

Es una ecuación diferencial parcial en la que se dice como la difusión causa un cambio de concentración respecto al tiempo y se describe mediante la ecuación 10:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial t} \right) \quad (10)$$

Siendo D el coeficiente de difusión y $\frac{\partial C}{\partial t}$ el gradiente de difusión, si D es una constante, la ecuación 10 se transforma en:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2}{\partial t^2} (C) \quad (11)$$

Donde C es la concentración con unidades de kg/m^3 (Vazquez, 2023). Algunos de los modelos derivados de esta ley son los siguientes:

Modelo Logarítmico

Es considerado el cuarto mejor modelo para descubrir los procesos de secado, también llamado modelo asintótico cuenta con tres constantes:

$$MR = a * \exp(-kt) + c \quad (12)$$

2.4.2.3 Modelos empíricos

Estos modelos permiten describir y predecir el comportamiento del proceso de secado sin necesidad de conocer todos los principios físicos involucrados. Estos modelos se basan en

datos experimentales obtenidos de pruebas de secado y permiten estimar parámetros como la velocidad de secado, la pérdida de humedad y la eficiencia del proceso

✚ Modelo Wang y Singh

Es un modelo típico del secado de plátano el cual incluye dos constantes y es bien conocido como el quinto mejor modelo, sin embargo, no tiene ninguna comprensión física o teórica.

$$MR = 1 + at + bt^2 \quad (13)$$

En donde a y b son las constantes de secado.

✚ Modelo Weibull

Es un modelo típico del secado de membrillo y ajo, tiene dos constantes:

$$MR = a - b * \exp(-k(t)^n) \quad (14)$$

Donde a y b son constantes adimensionales y k la constante de secado (Janjai & Bala, 2017).

2.5 Composición y valor nutricional de la fresa

2.5.1 La fresa

El fruto de fresa pertenece a las especies de plantas rastreras del género *Fragaria*, el nombre se relaciona con la fragancia que posee, en latín fraga y que pertenece a la familia de las rosáceas (*Rosaceae*). La característica principal es su intenso aroma, color rojo intenso y con un sabor que puede variar de ácido a dulce, coronada con sépalos color verde (M. E. P. Martínez et al., 2023). Es una fruta en la que su forma y tamaño varía en función de su especie, estas formas se pueden resumir en la **Figura 19**.



Figura 19. Formas más comunes de los frutos de fresa (Kirschbaum, 2021).

2.5.2 Valor nutricional

La composición del fruto maduro de la fresa es del 90% de agua y 10% de sólidos solubles, se considera una de las frutas más ricas en vitamina C (ácido ascórbico), donde se recomienda el consumo de 10 fresas diarias para poder obtener las cantidades requeridas de vitamina C para el cuerpo humano. Contiene fibra dietética que ayuda a la digestión y a regular el azúcar en la sangre, además de ser baja en calorías (Rivas, 2021). La composición nutricional de la fresa se puede observar en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Composición de las fresas por 100g (Obtenida de: <https://www.botanical-online.com/alimentos/fresas-fresones-propiedades>).

Composición de las fresas (frutos) por 100g	
Agua	91.57 g
Calorías	30 kcal
Grasa	0.37 g
Proteína	0.61 g
Hidratos de carbono	7.02 g
Fibra	2.3 g
Potasio	166 mg
Fósforo	19 mg
Hierro	0.38 mg
Sodio	1 mg
Magnesio	10 mg
Manganeso	0.29 mg
Calcio	14 mg
Cobre	0.049 mg
Zinc	0.13 mg
Vitamina C	56.7 mg
Vitamina A	0.03 mg
Vitamina B1	0.02 mg
Vitamina B2	0.066 mg
Vitamina B5	0.34 mg
Vitamina B6	0.059 mg
Vitamina E	0.140 mg
Niacina	0.230 mg

2.5.3 Compuestos bioactivos de la fresa

Las fresas constituyen una de las frutas con mayor capacidad antioxidante, la cual no sólo se debe a su contenido en antocianinas, sino también a la presencia en su composición de cantidades importantes de polifenoles y de ácido ascórbico los cuales tienen relación con la prevención del desarrollo de cáncer o problemas cardiovasculares (Sadik et al., 2023).

Compuestos fenólicos

La fresa es una fruta rica en compuestos fenólicos los cuales pueden ser de gran beneficio para la salud humana, principalmente se compone de ácidos fenólicos, flavonoides y taninos condensados (Milosavljević et al., 2020). En promedio, se estima que la fresa cuenta con un 41% de antocianinas, 28% de flavan-3-oles, 14% de elagitaninos, 13% conjugados de ácidos cinámicos, 3% de flavonoles y 1% de conjugados de ácido elágico (Arias, 2023). Estos compuestos son responsables de la calidad del fruto como su olor, sabor, color o firmeza, sin embargo, estas propiedades se pueden ver afectadas postcosechas por la madurez del fruto, su almacenamiento o exposición a la luz.

Antocianinas

En la fresa, las principales antocianinas presentes son en menor proporción la cianidina-3-glucósido (3%-32%), seguida de la pelargonidina-3-rutinósido (6%-17%) y en mayor proporción la pelargonidina 3-glucósido (52%-90%). Dentro las antocianinas en la fresa, los monoglucosídicos han sido las que más se han encontrado con un porcentaje del 94% aproximadamente (Aamer et al., 2021). La más importante que le otorga el color rojo es pelargonidina 3-glucósido al género de *Fragaria* (Parra-Palma et al., 2020). Sin embargo, este tipo de compuestos son menos estables en las fresas comparados con otras frutas, en postcosecha, son sensibles a la radiación que puedan recibir, al oxígeno, temperatura o los ácidos que se encuentren presentes (Erşan et al., 2022).

Ácido Ascórbico

La fresa es rica en vitamina C con promedio de 58 mg por cada 100 g de peso fresco, su contenido varía dependiendo de la variedad, sin embargo, estas cantidades pueden aumentar conforme el crecimiento o la maduración de la fresa (Liu et al., 2022).

2.6 Contexto productivo y aprovechamiento de la fresa en México

2.6.1 Producción de fresa en México

El principal consumo de la fresa es fresco, sus inicios del cultivo en México comenzaron aproximadamente a la mitad del siglo XX y en 1950 se exportaba a Estados Unidos. Los principales productores y exportadores de fresa en México son:

♣ Michoacán ♣ Baja California ♣ Guanajuato

La fresa representa solo el 1% de la superficie cultivada, en realidad la fresa se cultiva en 12 estados con un promedio de 631 miles de toneladas, pero los 3 anteriormente mencionados son los productores más significativos de México en donde Michoacán aporta el 52.38% (431 miles de toneladas) de la producción nacional de fresa; Baja California, el 24.19% (123 miles de toneladas); y Guanajuato, el 14.98% (79 miles de toneladas) (M. E. P. Martínez et al., 2023). El 52% de la producción de fresa se destina al mercado externo, como puede observarse en la **Figura 20**, México fue el segundo lugar de exportación mundial de fresa en el 2016, por lo que su cultivo es un éxito en el comercio internacional. México es el tercer proveedor de fresa en el mercado a nivel internacional con un valor del 14.83% del valor de las exportaciones a nivel mundial (Rovirosa, 2017).

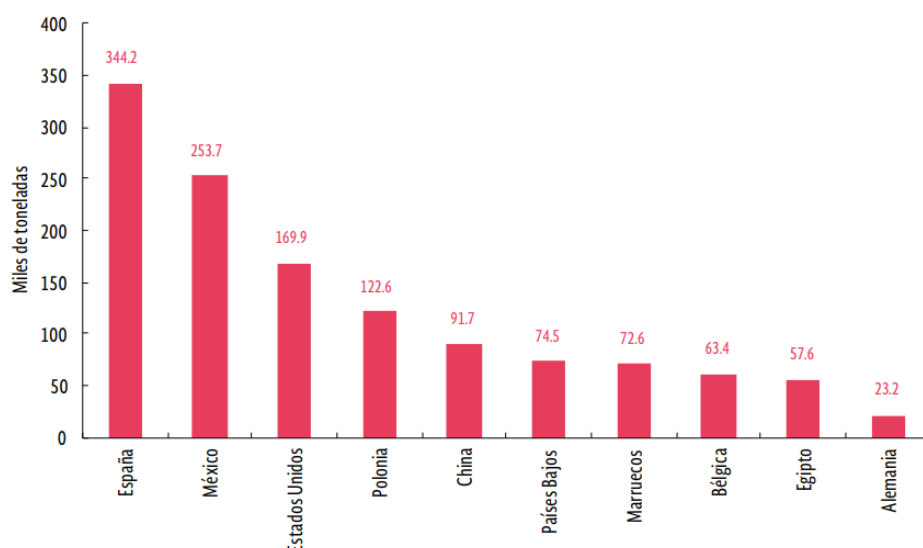


Figura 20. Principales exportadores mundiales de fresa en 2016 (Rovirosa, 2017).

2.6.2 Desperdicio nacional de fresa

A nivel nacional, el consumo de fresa en el año 2016 fue de 232.25 miles de toneladas, donde el consumo anual per cápita de fresa estimado hasta el 2030 fue de 3.2 kg (Rovirosa, 2017).

En el año 2022, México se catalogó como el país de América latina donde más se desperdician alimentos de origen vegetal con un valor de 930 millones toneladas (Barrios & Díaz, 2023). Durante la producción de estos alimentos, se puede tener pérdidas del 45% de frutas y verduras, pues al ser frescos, su durabilidad es poca en los lugares donde se comercializan (Álvarez et al., 2023). El estado de Colima produce frutos rojos (entre ellos la fresa) posicionándose en tercer lugar como productor nacional de estos alimentos durante el año del 2022. Sin embargo, cerca del 30% de los alimentos producidos son descartados por los agricultores al no contar con técnicas de almacenamiento como la refrigeración o de conservación como el deshidratado (Barrios & Díaz, 2023). Un estudio realizado por Álvarez et al., 2023 en el mercado más grande y antiguo de Ozumba de Alzate, Estado de México, mostraron el desperdicio de las frutas más demandadas del mercado, donde la fresa tuvo cantidades de 99.1 kg de desperdicio semanalmente como se puede observar en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Volumen de desperdicio semanal de frutas (Álvarez et al., 2023).

Alimento	Volumen de desperdicio (Kg)	Peso por porción (g)	Número de porciones
Durazno Amarillo	27.1	174	155.5
Fresa entera	99.1	204	485.9
Guayaba	86.0	135	637.0
Limón	14.8	232	63.6
Mamey	39.5	137	288.3
Mango picado	619.0	165	3,751.5
Manzana	461.5	138	3,344.0
Melón	158.1	271	583.4
Naranja	281.3	242	1,162.2
Papaya	99.3	140	708.9
Pera criolla	28.5	95	299.2
Piña	423.5	124	3,415.3
Plátano	657.3	80	8,215.6
Sandia picada	604.0	160	3,775.0
Uva	10.4	126	82.1
Total	3,509.9		26,481.75

En la **Tabla 4** se observan las pérdidas económicas de las frutas más demandadas, siendo para la fresa de 3,537.8 MNX semanal y de 183,965.6 MNX anual.

Tabla 4. Análisis económico de los desperdicios de frutas (Álvarez et al., 2023).

Nombre	Desperdicio (kg.)		Pérdida (\$)		Utilidad que se deja de percibir (\$)	
	Semanal	Anual	Semanal	Anual	Semanal	Anual
Durazno	27.0	1,404.0	810.0	42,120.0	562.4	29,245.3
Fresa	99.1	5,153.2	3,537.8	183,965.6	2,408.2	125,226.4
Guayaba	86.0	4,472.0	1,720.0	89,440.0	817.0	42,484.0
Limón	14.7	764.4	441.0	22,932.0	147.0	7,644.0
Mamey	39.5	2,054.0	671.5	34,918.0	711.0	36,972.0
Mango	619.0	32,188.0	18,570.0	965,640.0	3,714.0	193,128.0
Manzana	461.4	23,992.8	19,378.8	1,007,697.6	3,691.2	191,942.4
Melón	158.1	8,221.2	2,371.5	123,318.0	1,481.4	77,032.6
Naranja	281.2	14,622.4	5,202.2	270,514.4	3,233.8	168,157.6
Papaya	99.2	5,158.4	2,480.0	128,960.0	496.0	25,792.0
Pera Criolla	28.4	1,476.8	568.0	29,536.0	1,050.8	54,641.6
Piña	423.5	22,022.0	4,658.5	242,242.0	8,647.8	449,689.2
Plátano	657.2	34,174.4	12,105.6	629,491.2	972.6	50,579.3
Sandia	604.0	31,408.0	6,040.0	314,080.0	604.0	31,408.0
Uva	10.3	535.6	412.0	21,424.0	515.0	26,780.0
Totales	3,608.6	187,647.2	\$78,966.9	\$4,106,278.8	\$29,052.2	\$1,510,722.4

Para minimizar las pérdidas postcosecha, se exploran métodos de conservación como el deshidratado de frutas, una técnica que ha ganado gran popularidad con el tiempo. El uso de estas frutas deshidratadas ha incrementado con el paso de los años incorporándolos en la dieta habitual como ensaladas, pastas o postres, aportando nutrientes y beneficios a la salud.

2.6.3 Usos de la fresa deshidratada en México

La fresa deshidratada se ha comercializado en pequeña escala para su consumo como un snack saludable debido a que su forma de consumo tradicionalmente es la fresca. La incorporación de la fresa deshidratada como snack tiene como propósito que se pueda tener una combinación y complementación con otros alimentos a lo largo del día para poder incrementar su consumo a gran escala.

Un estudio realizado por Castañeda Villanueva y colaboradores estudiaron la aceptabilidad de la fresa como snack saludable en un grupo de estudiantes entre 18 y 22 años de edad, tratada con diferentes edulcorantes de estevia, sucralosa, aspartame y sacarosa. Se evaluaron

parámetros de calidad como el color y olor mediante una escala hedónica de 8 puntos; la textura se clasificó como granulosa, suave, seca, esponjosa, dura y jugosa; y el sabor, categorizado como dulce, amargo y ácido. Los resultados del estudio indican que la fresa deshidratada con el pretratamiento de aspartame presenta una mayor aceptabilidad por parte de los consumidores, evidenciando su viabilidad tanto para su consumo directo como para su incorporación con otros alimentos (Castañeda-Villanueva et al., 2019).

La deshidratación de fresas ha ganado importancia con el tiempo, empresas como DeFRUT desarrollan y producen alimentos deshidratados de alta calidad a gran escala para la industria alimentaria en México. Estos productos se utilizan en la preparación de bebidas, papillas, licuados, atoles, gelatinas, sopas o salsas. Dentro los alimentos deshidratados que se producen se encuentra la fresa, presentada en forma de hojuela o polvo (**Figura 21**), destinada a la preparación de:

- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| ♣ Dulces | ♣ Barras energéticas |
| ♣ Bebidas | ♣ Gelatinas productos |
| ♣ Lácteos | ♣ Naturistas |
| ♣ Rellenos de panadería | ♣ Complementos alimenticios |



Figura 21. Presentaciones de fresa deshidratada en DeFRUT (<https://defrut.com.mx/frutas-deshidratadas/fresa/>).

2.7 Estudios previos del secado solar de frutas

2.7.1 Estado de Zacatecas

En el programa de Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de Zacatecas se han llevado a cabo trabajos de deshidratación de alimentos con secadores solares directos de acrílico transparente. Estas tecnologías se han centrado en la convección natural (CN) y la convección forzada (CF), los trabajos se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 5. Investigaciones de deshidratado de frutas.

Autores	Alimento	Tecnología de secado	%Humedad final y tiempo de secado (h)	
			CN	CF
(Ortiz Quezada et al., 2019)	Manzana (Granny Smith)	Secador directo CN y CF	16.73%, 9h	17.0%, 9.3h
(Bañuelos Mireles et al., 2019)	Durazno (Prunus pérsica)	Secador directo CN y CF	9%, 8.3h	11%, 11.6h
(Tenorio-Reyes et al., 2019)	Pera (Pyruscommunis)	Secador directo CN y CF	5.9%, 13.5h	7.6%, 13.5h
(Tenorio-Reyes et al., 2020)	Kiwi (Actinidia chinensis)	Secador directo CN y CF	12.6%, 17h	16.2%, 17h
(M. Carrillo-Carrillo et al., 2020)	Piña (Ananas comosus)	Secador directo CN y CF	15.5%, 21h	15.7%, 21h
(Manuela Carrillo-Carrillo et al., 2020)	Plátano (Musa paradisiaca)	Secador directo CN y CF	20.87%, 8h	20.8%, 8h
(Ramírez et al., 2019)	Tuna Blanca	Secador directo CN y CF	34.73%, 3h	23.31%, 3h

Además de los trabajos de secado solar en la Universidad Autónoma de Zacatecas, el estado cuenta con una planta termosolar en el municipio de Morelos, destinada principalmente al deshidratado de chile guajillo, guayaba y otros productos agrícolas. Esta planta cuenta con una cámara de secado por aire caliente a convección forzada. El aire utilizado se calienta

mediante una serie de 48 colectores solares de placa plana y 40 colectores solares de agua, respaldados de un quemador de gas LP cuando no se tenga disponibilidad del recurso solar durante el transcurso del día. Una de las pruebas realizadas en la planta termosolar fue el secado de Nopal en un tiempo de 14.3 y 11.7 horas con una temperatura de 59°C, en la mayor parte del proceso se utilizaron los sistemas solares para el calentamiento de aire, finalizando con el quemador de gas LP cuando ya no había horas de Sol (García-Valladares et al., 2020).

El uso de la convección natural en los procesos de secado se destaca al obtener tiempos significativamente más cortos en comparación con la convección forzada, como se demostró en los trabajos de deshidratado de manzana y durazno. Estos menores tiempos de secado también permiten obtener las humedades finales más bajas de las frutas asegurando su estabilidad microbiológica, prolongando su vida útil y conservar su calidad nutricional.

2.7.2 Nivel Nacional

En el deshidratado de fresa, se han realizado diversas investigaciones en el Instituto de Energías Renovables y en el Instituto Politécnico Nacional evaluando sus compuestos bioactivos presentes y el uso de cubiertas para evitar la degradación de esos compuestos como se muestra a continuación:

Rodríguez y colaboradores estudiaron el efecto de las cubiertas de policarbonato celular y polietileno blanco sobre los compuestos fenólicos totales en el secado de fresas a sol abierto. El uso de estas cubiertas permitió alcanzar las condiciones de temperaturas necesarias para llevar a cabo la deshidratación en periodos razonablemente cortos (8 horas) y obtener un contenido de humedad que de la estabilidad al producto. El contenido inicial de fenoles fue de 67.05 mg GAE/g de extracto, las cubiertas de polietileno absorbieron el 84.6% con un contenido de compuestos fenólicos final de 33.49 mg GAE/g de extracto. Las cubiertas de policarbonato celular la UV dentro de la cámara fue casi nula y los compuestos fenólicos se redujeron a 12.88 mg GAE/g de extracto. La temperatura promedio de referencia fue de 34.01°C, con el uso de cubierta de polietileno se redujo a 30.7°C y para la cubierta de policarbonato celular aumentó a 39.43°C. (Rodríguez-Ramírez et al., 2021)

Al ser el secado solar directo el que más afecta los compuestos bioactivos y características físicas de los frutos debido a la radiación UV, López Ortiz y colaboradores estudiaron el efecto de recubrimientos comestibles en el deshidratado solar directo de fresa. Evaluaron el contenido fenólico total (CTF) y el contenido de antocianinas (CA). Las cubiertas de Mucilago de *Opuntia ficus-indica* (M) y Mucilago fenugreek (F) conservaron satisfactoriamente el CTF de 6.85 mg GAE/g a 5.9 mg GAE/g de extracto para M de extracto a y 2.15 mg GAE/g de extracto para F. De forma contraria, el CA aumentó de 0.48 mg C3G/L a 4.91 mg C3G/L para M y disminuyó a 0.18 mg C3G/L para F. Se sugiere que para obtener un incremento de estos componentes (contenido de antocianinas) se tenga una transmitancia parcial de la luz UV sobre las fresas (López-Ortiz et al., 2021).

López Vidaña y colaboradores realizaron el deshidratado de fresa comparando dos tecnologías de secado: un secador solar directo y un secador solar de túnel (indirecto), con la finalidad observar que tecnología permitía conservar en mayor medida el contenido de fenoles totales. En secador solar directo, los fenoles totales disminuyeron de 97.2 mg GAE/g a 17.66 mg GAE/g de extracto con un tiempo de 7 horas y siendo el secador directo mejor respecto al indirecto. Por otro lado, en el secador indirecto disminuyeron a un 10.49 mg GAE/g con un menor tiempo de secado de 5 horas, por lo que el flujo de aire, la temperatura y la radiación solar son un factor a considerar para poder lograr y conservar en mayor cantidad los fenoles totales de la fresa (César et al., 2015).

Los antioxidantes de los frutos son de vital importancia para el ser humano, pues son moléculas que ayudan a proteger a las células del daño ocasionado por radicales libres. Navarrete y colaboradores estudiaron el efecto del uso de filtro de luz UV-Blue (películas delgadas de seleniuro de sulfuro de cobre) sobre policarbonato celular en un secador directo y sin filtro en pulpa de fresa. Los resultados obtenidos fueron un mayor tiempo de secado de casi 30 minutos para el secador con filtro, sin embargo, la disminución de fue menor con un valor de 27.5 mg AA/g_{ds} a 10 mg AA/g_{ds}. En el secado sin filtro, la actividad antioxidante disminuyó a 8.7 mg AAE/g_{ds} (Navarrete Salgado et al., 2021).

Macedo y colaboradores deshidrataron fresa pretratada osmóticamente con isomaltulosa al 35% y no pretratada mediante un secador de microondas intermitente y secador por aire caliente, ambas formas de deshidratado fueron eficientes produciendo fresas con una buena

calidad nutricional y bajo contenido de humedad. El pretratado osmótico causó algunas pérdidas de nutrientes, dureza y cambio de color en la fresa, mientras que el secado por microondas para las fresas sin pretratamiento obtuvo retenciones de hasta 47.46%, 70.26% y 81.18% de antocianinas, compuestos fenólicos y capacidad antioxidante respecto a las fresas frescas que contaban con 15.02 C3G/100g de antocianinas, 745.88 GAE/g de fenoles totales y 11.05 mg AA/g_{ds} de capacidad antioxidante. El tiempo de secado fue más corto para el microondas con las fresas sin pretratamiento comprado con el secador de aire caliente, ambos operando a una temperatura de 60°C (Macedo et al., 2022).

Méndez Lagunas y colaboradores estudiaron las cinéticas de degradación sobre la actividad antioxidante, antocianinas y contenido fenólico total de la fresa mediante un secador de aire caliente a 50 y 60 °C durante 360 minutos. Inicialmente las fresas contenían 32.14 mg AAE/g_{ds} de capacidad antioxidante, 276.5 C3G/100 g_{ds} de antocianinas y 264.25 GAE/g de contenido fenólico total. Los resultados obtenidos muestran menores pérdidas del 62.2% a 60°C para la capacidad antioxidante, 26% para el contenido de antocianinas a 50°C y 60.9% a 50°C para el contenido fenólico total. Los autores concluyen que el secado de fresas a bajas temperaturas (50°C) puede conservar de mejor manera los compuestos antioxidantes (Méndez-Lagunas et al., 2017).

La exposición a la radiación UV en los secadores solares directos provoca una disminución significativa los compuestos bioactivos presentes en la fresa, como los compuestos fenólicos, antocianinas totales y su capacidad antioxidante. Las cubiertas de policarbonato transparente han demostrado su eficacia para bloquear gran parte de la radiación UV, favoreciendo la conservación de los compuestos bioactivos. No obstante, las altas temperaturas alcanzadas con este tipo de cubiertas pueden acelerar los procesos de oxidación de estos compuestos, poniendo en riesgo la calidad de la fresa deshidratada.

Por consiguiente, el uso de ventiladores para generar convección forzada puede reducir las altas temperaturas que se alcanzan en el interior al mantener un flujo de aire uniforme e incrementar la velocidad de secado empelando cubiertas de policarbonato transparente. En contraste con las cubiertas comestibles que, aunque también protegen, pueden incrementar el costo del proceso y la complejidad del proceso.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La fresa fresca en México es muy importante, se produce y exporta siendo el segundo país productor a nivel mundial (M. E. P. Martínez et al., 2023). No obstante, al ser una fruta altamente perecedera, su durabilidad postcosecha puede ser de menos de 5 días de 0-4 °C, por lo que el consumidor final llega a desecharla sin haberla consumido contribuyendo a la contaminación del ambiente (Díaz et al., 2023). Ejemplo de ello es en uno de los mercados más grandes del estado de México, desperdiciándose semanalmente 99.1 kg de fresa en el mercado de Ozumba (Álvarez et al., 2023).

El método común para producir fresa deshidratada es mediante aire caliente, que usa energías convencionales contribuyendo a la contaminación atmosférica. Se estima que el uso de la energía solar para estos procesos podría reducir el consumo entre un 20-80% de las energías convencionales (Agbo et al., 2021). Los dispositivos para su aprovechamiento han mejorado sus eficiencias en la captación de la energía solar y diseños que permiten acelerar el secado.

Sin embargo, la exposición directa a la radiación solar y UV impacta en la pérdida de la calidad de la fresa como color natural, sabor y composición nutricional. Otro parámetro que juega un papel importante es la temperatura de deshidratado, los altos valores de temperaturas alcanzados dentro de los secadores directos pueden comprometer la calidad de los alimentos (López-Ortiz et al., 2021).

Por las razones anteriores, este trabajo está enfocado al estudio de los efectos de la radiación solar en los diferentes materiales de fabricación de los secadores solares y la incorporación de dispositivos de circulación forzada de aire sobre la calidad del deshidratado de la fresa. Esto contribuirá a entender y mejorar los procesos de deshidratado de otras frutas, y su aplicación a nivel industrial.

4. JUSTIFICACIÓN

La deshidratación de alimentos permite prolongar su vida de anaquel disponiendo de ellos en temporadas que no se producen. Contribuye a evitar su desperdicio por la corta durabilidad de algunos alimentos al tener un alto contenido de agua (más del 80% de su composición), como es el caso específico es el de la fresa, que su duración no va más allá de 5 días a condiciones ambientales.

Un ejemplo de la incorporación del uso de energía solar para el deshidratado de alimentos es la planta termosolar instalada en Morelos Zacatecas. Es una planta híbrida donde durante el día se utiliza la energía solar para el deshidratado y por la tarde, cuando ya no se tiene disponibilidad del Sol, se tiene como respaldo la utilización de gas LP para la generación de aire caliente. Los productos agrícolas comúnmente deshidratados es chile guajillo y la guayaba que son característicos del estado.

Entre los dispositivos solares de secado, se encuentran los del tipo directo, los cuales tienen el principal problema de la pérdida de la calidad del producto por la incidencia de la radiación UV y las altas temperaturas que se llegan a alcanzar dentro de las cámaras de secado. El trabajo plantea el uso de diferentes materiales como el policarbonato transparente que tienen la capacidad de filtrar gran parte de la radiación UV en comparación con el de acrílico transparente que es el material utilizado para su fabricación y el uso de secadores de aire caliente que es el método comúnmente utilizado en el deshidratado de alimentos. Para disminuir las altas temperaturas dentro de los secadores se hará uso de ventiladores en forma de extractor de aire para evitar la saturación de vapor de agua en el interior y que circule de forma más rápida el aire comparado con la convección natural.

La contribución del trabajo es obtener fresa deshidratada de alto valor agregado, un equipo prototipo optimizado para el deshidratado de fresa, bases experimentales para futuros trabajos y la obtención de un modelo matemático que pueda ser utilizado para la simulación del proceso de deshidratado de fresa.

4.1 Impacto social

El presente proyecto tiene un impacto social relevante en el área de energías y cambio climático, la incorporación del uso de secadores solares directos representa una alternativa sostenible y de bajo costo frente a los métodos de deshidratado que hacen uso de energías no renovables. Estas tecnologías de secado pueden ser replicables en zonas rurales con un acceso limitado a la energía eléctrica al hacer uso de la energía solar como una fuente limpia y accesible, promoviendo el uso de las tecnologías para el procesamiento de alimentos. Al disminuir el consumo de las energías no renovables, el proyecto contribuye a la mitigación del cambio climático a causa de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Asimismo, se tiene un impacto en la soberanía alimentaria, dando un mayor valor agregado a los productos y promoviendo su conservación con el uso de tecnologías sostenibles y amigables con el medio ambiente. La aplicación del secado solar que favorece la retención de compuestos bioactivos en las frutas, genera un valor agregado que fortalece las economías rurales, evita el desperdicio alimentario y coadyuva a la salud de los consumidores.

5. HIPÓTESIS

El uso de secadores solares directos elaborados con policarbonato transparente operando a convección forzada, deteriora en un 10% menos las antocianinas totales y se obtiene el menor cambio total de coloración de la fresa deshidratada en comparación con los secadores por aire caliente.

6. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la radiación UV sobre los compuestos bioactivos y las propiedades fisicoquímicas de la fresa en un secador solar directo elaborados de diferentes materiales transparentes operando a convección natural y forzada.

6.1 Objetivos específicos

1. Determinar el color, humedad, actividad de agua, fenoles totales, antocianinas totales y ácido ascórbico de la fresa fresca y deshidratada para su comparación entre los diferentes tipos de secadores utilizados.
2. Obtener las cinéticas de secado de la fresa para la observación de las diferencias de la pérdida de humedad entre los secadores utilizados en la experimentación.
3. Ajustar las cinéticas a un modelo analítico de secado mediante el software DataFit para la optimización del proceso de deshidratado de fresa.
4. Comparar la radiación UV incidente en el material de fabricación los secadores solares directos respecto a la radiación UV que logra pasar a través de ellos, mediante biómetros 501 Solar Light.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1 Reactivos

Etanol, ácido clorhídrico, fluoruro de sodio, reactivo Folin-Ciocalteu (mezcla de molibdato sódico y wolframato sódico en ácido fosfórico), carbonato de sodio, agua destilada, ácido gálico, 2,6-diclorofenolindofenol, ácido metafosfórico, bicarbonato de sodio y ácido ascórbico.

7.2 Determinación de las propiedades fisicoquímicas de la fresa

La experimentación se realizó en agosto del 2024 (verano) y febrero del 2025 (invierno), esto debido a la cantidad de radiación que se recibe en la superficie de la tierra (descrito en el apartado 2.2), afectando principalmente la temperatura del aire, influyendo en la velocidad de secado y la retención de los compuestos bioactivos de la fresa. En verano se tienen procesos de secado solar más rápidos a causa una mayor cantidad radiación solar en comparación con invierno, que es la época en la que menos se recibe.

Contenido de humedad inicial

Las fresas se obtuvieron del mercado de abastos en Fresnillo Zacatecas, con un grado de madurez comercial (dos días de haber sido cortadas según el proveedor) de apariencia y tamaño similar, se lavaron, desinfectaron y se cortaron en rodajas de espesor de 0.3 cm (espesor proporcionado por el rebanador de frutas) para la determinación de su contenido inicial de humedad empleando una termobalanza OHAUS a temperatura de 100°C hasta que su peso se mantuvo constante realizado por triplicado (**Figura 22**).



Figura 22. Analizador de humedad OHAUS.

Actividad de agua

Para la medición de la a_w de las fresas frescas y deshidratadas, se determinó con un medidor de agua Power TX WA-160 (**Figura 23**) cubriendo por completo el recipiente de plástico de las muestras y colocándolo dentro del medidor durante 5 minutos a temperatura ambiente y realizándolo por triplicado para cada muestra.



Figura 23. Medidor de a_w Power TX

Cambio de coloración

Al igual que en la determinación del contenido de humedad, se escogieron 3 rodajas de apariencia y tamaño similar de la fresa fresca y, posteriormente deshidratada de los diferentes secadores utilizados (Sección 7.4). Además, se midió la coloración externa de las fresas frescas a deshidratar (índice de coloración) para determinar que todas se encontraran en un mismo grado de madurez de forma que la cuantificación de sus compuestos bioactivos no tuviera grandes diferencias mediante un colorímetro TPM (**Figura 24**).

Los valores arrojados de los parámetros L^*a^*b se introdujeron al convertidor de color NixSensor disponible de forma gratuita en la web para obtener el código HEX que se ingresó en la hoja de cálculo de Excel que es el sistema de coloración con el que cuenta. Finalmente se obtuvo el color en el que se encontraban las muestras y la diferencia total de color (ΔE) se determinó con la ecuación 4.



Figura 24. Colorímetro TPM (Del Rio Félix, Carrera Arellano, et al., 2019).

7.3 Cuantificación de fenoles totales, antocianinas y ácido ascórbico

La cuantificación de los fenoles totales, antocianinas y ácido ascórbico se determinó para las fresas frescas y deshidratadas por triplicado en el Laboratorio de Inocuidad en Investigación de alimentos de Nutrición.

Primero se realizó una extracción del contenido fenólico triturando 5 g de fresa fresca a los cuales se le añadieron 20 mL de EtOH con 5 mL de HCl 6N y 4 mg de NaF, se mezclaron con agitación continua durante 30 minutos a temperatura ambiente, se centrifugó durante 5 minutos a 4,500 rpm y se filtró.

En el caso de las fresas deshidratadas, se molieron y la cantidad de muestra requerida para la extracción del contenido fenólico fue de 2 g siguiendo el mismo procedimiento.

Contenido fenólico total (CFT)

El CFT se determinó mediante el método del reactivo Folin-Ciocalteu (una mezcla de molibdato sódico y wolframato sódico en ácido fosfórico, **Figura 25**). Se mezclaron 250 μ L de extracto de CFT con 15 mL de agua destilada y 1.25 mL de reactivo Folin-Ciocalteu en un matraz aforo de 25 mL. Se agitó y después de 8 minutos, se añadieron 3.75 mL de Na_2CO_3 al 7.5% y se enrasó a 25 mL con H_2O destilada esperando un tiempo de 2 horas.

La absorbancia se midió a 765 nm en un espectrofotómetro UV-Vis marca Thermo Scientific 10S, los resultados se expresaron como mg equivalentes de ácido gálico por 100 g de muestra seca (mg GAE/100 g_{ss}). Se elaboró una curva patrón de ácido gálico a diferentes concentraciones (200, 300, 400, 500, 600 y 700 ppm) que se analizaron bajo el mismo procedimiento que las muestras.

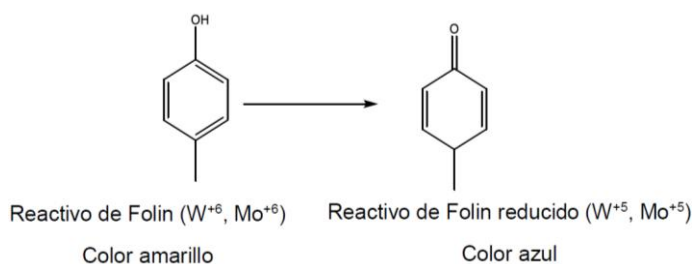


Figura 25. Mecanismo de acción del reactivo de Folin-Ciocalteu (P. I. S. Martínez, 2021).

Antocianinas totales (AT)

El contenido de antocianinas totales se determinó tomando un vaso de precipitado en el que se pesaron 0.5 g de fresa fresca y se adicionaron 4 mL de EtOH acidificado (42.5 mL EtOH y 7.5 mL HCl 1 N), se protegieron de la luz con papel aluminio y agitaron 2 minutos. Se midió el pH ajustándolo a 1 con HCl a 6 N. Nuevamente se agitó durante 30 minutos y se centrifugó a 4,500 rpm por 5 minutos y se recuperó el sobrenadante.

A valores de pH <2 se mantiene la forma de catión flavilio, la cual presenta un color rojizo a anaranjado, siendo a pH más bajos el color rojo predominante en las antocianinas como se muestra en la **Figura 26** (He & Monica Giusti, 2010):

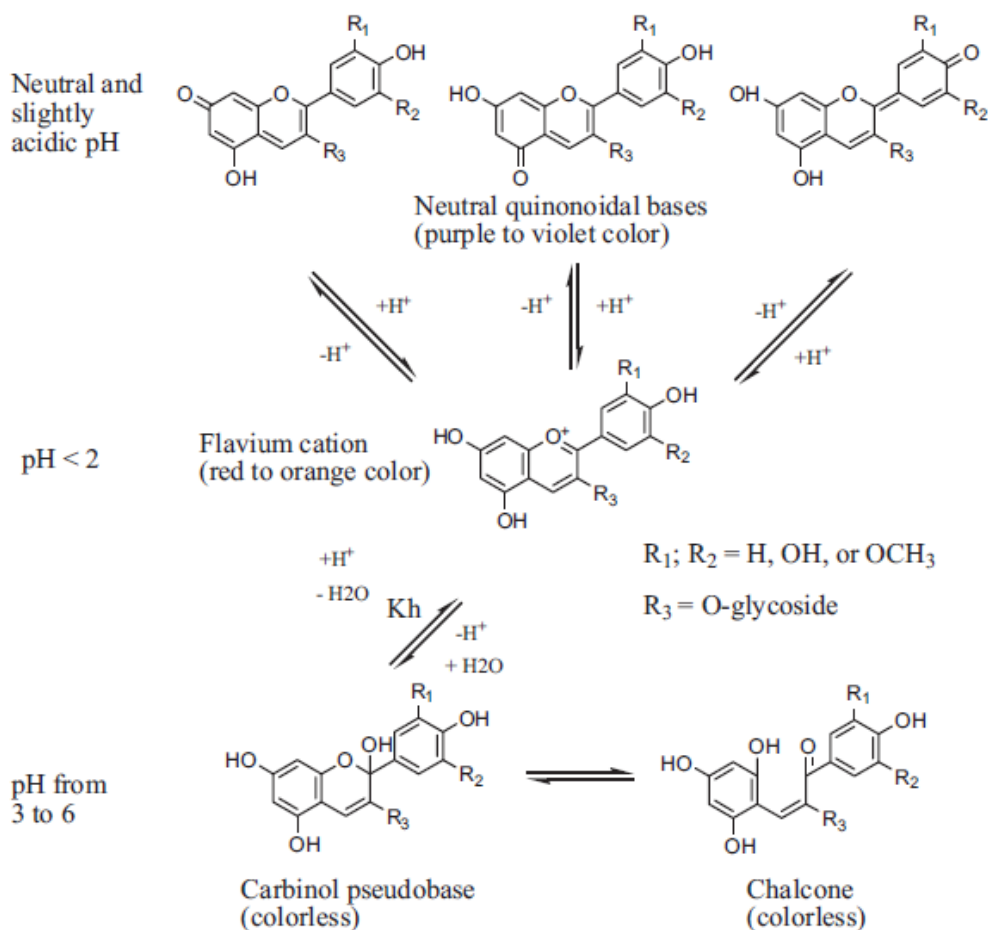


Figura 26. Esquema de interconversión estructural de antocianinas dependiente del pH (He & Monica Giusti, 2010).

El sobrenadante recuperado se aforó en un matraz a 10 mL con EtOH acidificado y se midió su absorbancia a 535 nm en un espectrofotómetro UV-Vis marca Thermo Scientific 10S. El contenido de antocianinas totales se expresó como mg equivalentes de cianidina-3-glucósido por 100 g de muestra seca (mg C3GE/100 g_{ss}). La fórmula empleada y obtenida por (Abdel-Aal & Hucl, 1999) fue:

$$AT = \left[\left(\frac{A}{E} \right) \times \left(\frac{V}{1000} \right) \times (PM) \times \left(\frac{1}{g \text{ muestra}} \right) \times 10^6 \right] / 1000 \quad (15)$$

Donde A es la absorbancia de la muestra en nm, E es el coeficiente de absortividad molar de 25,965 cm⁻¹M⁻¹, V es el volumen total del extracto en mL y PM es el peso molecular de la cianidina-3-glucósido con un valor de 449 g/mol.

🚦 Ácido Ascórbico (AA)

La determinación del ácido ascórbico se realizó por el método del 2,6-diclorofenolindofenol (DCPI), el AA se oxida con un indicador de DCPI mostrando un color azul en medio básico y rojo en medio ácido, el cual en presencia de un medio ácido se ve reducido como se muestra en la **Figura 27**.

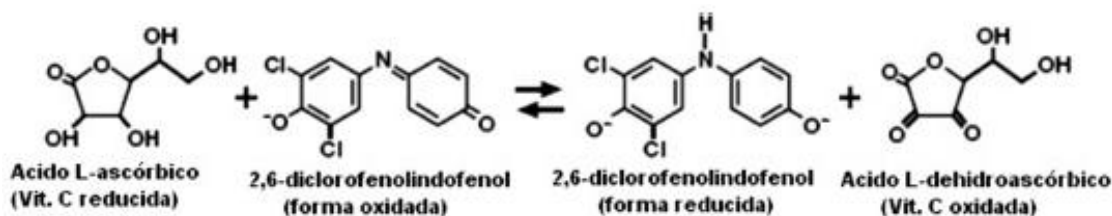


Figura 27. Esquema de reacción de oxidación del ácido ascórbico (Cuse Quispe et al., 2021).

Inicialmente se prepararon 3 soluciones:

- **Solución de ácido metafosfórico al 25 % (HPO₃):** se pesaron 12.5 g de HPO₃, posteriormente se le añadieron 20 mL de H₂O destilada y se agitó.
- **Solución de DCPI:** se pesaron 80 mg de este mismo reactivo (DCPIP) y 2 mg de NaHCO₃ (bicarbonato de sodio) los cuales se colocaron en un papel filtro, se

realizaron dos enjuagues con H₂O destilada para ser disueltos y se enrasó a 100 mL con H₂O destilada.

- **Solución de ácido ascórbico:** se pesaron 25 mg de ácido ascórbico los cuales se disolvieron en 20 mL de la solución de ácido metafosfórico al 25% y se enrasó con H₂O destilada en un matraz aforo de 100 mL.

Para la preparación de las muestras se trituraron 30 g de fresa fresca, se pesaron 10 g en tubos de ensayo y después se centrifugaron por 5 minutos a 4,500 rpm. Se pesó 1 g de jugo en 3 matraces aforo de 50 mL, se le añadieron 10 mL de la solución de ácido metafosfórico al 25% y se enrasaron con H₂O destilada. Para las fresas deshidratadas, se pesó 0.1 g de muestra en polvo, siguiendo el mismo procedimiento que las fresas frescas.

A las fresas frescas se le agregaron 0.02 g de carbón activado para decolorar la muestra y tomar 10 mL los cuales se valoraron con la solución del DCPI hasta que tornó a un color rosa pálido.

El patrón de ácido ascórbico, de igual forma que la valoración de las muestras, se tomaron 10 mL de la solución de ácido ascórbico y se valoraron con la solución del DCPI hasta que tornó a un color rosa pálido.

La cantidad de ácido ascórbico se calculó con la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{mgAA}}{100 \text{ g}} = \frac{V_t \left(\frac{2.5}{V_p} \right) (5)}{\text{g de muestra}} (100) \quad (16)$$

Donde V_t son los mL gastados en cada valoración de la muestra y V_p los mL gastados en la valoración del patrón de ácido ascórbico.

7.4 Preparación de los secadores y muestras de fresa para el deshidratado

Los secadores acrílico transparente cuentan con dimensiones de 74 cm x 80 cm de base y una altura al frente de 13 cm y al fondo de 40 cm. Además, se fabricó un secador con el mismo diseño y dimensiones de policarbonato celular transparente.

Fueron colocados en funcionamiento media hora antes de iniciar el secado para estabilizar la temperatura interna con orientación hacia el sur. Estos secadores cuentan con perforaciones circulares pequeñas para así permitir la entrada y salida del aire operando mediante convección natural. Para la convección forzada a los secadores se les acopló un ventilador de 8 pulgadas de diámetro conectado a dos paneles solares para el suministro de energía.

En la **Figura 28** se muestra el diseño de los secadores de acrílico y policarbonato transparente, así como el ventilador y los paneles utilizados.

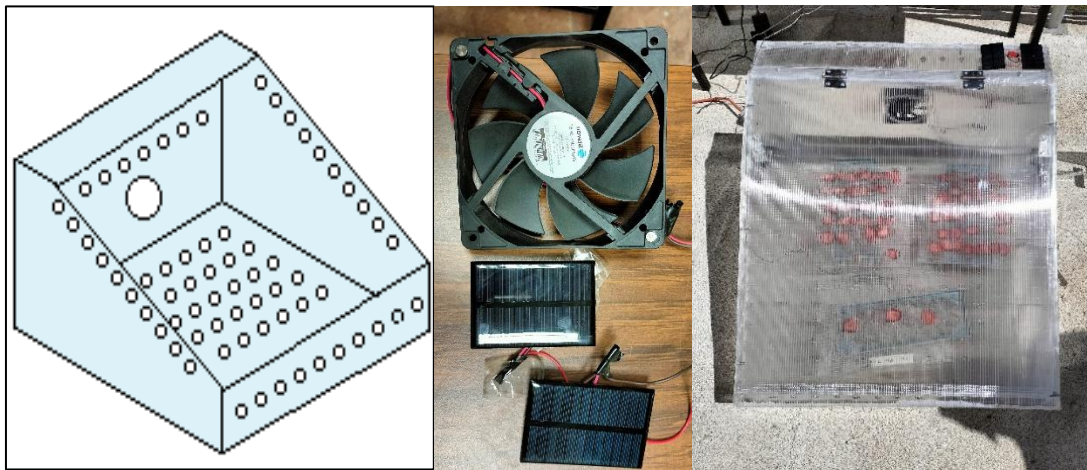


Figura 28. Diseño de los secadores directos y ventilador utilizado.

Para la comparación con otro método de deshidratado, se utilizó un secador de alimentos por aire caliente marca Hamilton Beach 32100A de 5 bandejas (**Figura 29**). La temperatura de operación fue de 60°C, que es la temperatura en donde no se tiene una gran pérdida las propiedades nutrimentales de la fresa en un estudio realizado por Muñiz *et al.* 2023.



Figura 29. Secador de aire caliente Hamilton Beach.

Para la medición de la temperatura en cada una de las bandejas del secador por aire caliente, se hicieron pequeñas perforaciones a los costados para introducir termómetros digitales TP300 registrando su temperatura en intervalos de 20 minutos, el arreglo del secador se puede observar en la **Figura 30**.



Figura 30. Secador por aire caliente con termómetros en cada bandeja

Las fresas se cortaron en rodajas con un rebanador de frutas con espesor de 3 mm y colocaron en charolas de malla polimérica con dimensiones de 34.2 cm de largo y 24 cm de ancho. Una vez se estabilizó la temperatura interna de los secadores, las charolas con las muestras se introdujeron para así dar inicio al proceso de secado.

Las mediciones de temperatura, radiación UV y velocidad del aire dentro de los secadores solares se midieron con los instrumentos presentados en la **Tabla 6**:

Tabla 6. Instrumentos de medición.

EQUIPO	FUNCIÓN
Radiómetro de biómetro UV modelo 501 	Sensor meteorológico que mide la radiación solar UVB ponderada dentro de los secadores.
Anemómetro UNIT-T UT363 	Medición de la velocidad del aire dentro del secador solar que opera por convección forzada.
Sonda de sensor de temperatura RTD PT 100 	Sensor para la medición de la temperatura dentro de los secadores solares.
CR 1000 	Adquisidor de datos que registra y almacena los datos obtenidos de los instrumentos de medición (biómetro y sensores de temperatura).

Para el registro de la radiación UV exterior, se tomaron los datos de la Estación Solarimétrica Zacatecas de la Red Solarimétrica Mexicana (del Instituto de Geofísica de la UNAM) que se encuentra instalada en el edificio 6 perteneciente al Programa de Ingeniería Química en el Campus UAZ.



Figura 31. Estación Solarimétrica de Zacatecas.

7.5 Obtención de la cinética de secado

Iniciado el proceso de deshidratado de fresas, se escogieron 3 muestras representativas y se enumeraron, se registró su peso cada 30 minutos durante las primeras 3 horas y después cada 60 minutos hasta que la humedad fuera $\leq 10\%$.

Obtenidos las humedades y pesos de las muestras, se generó la curva típica de secado graficando los pesos respecto al tiempo, humedad en base húmeda respecto al tiempo y la velocidad de secado respecto a la humedad en base seca. Construidos los distintos tipos de gráficos, se procedió a ubicar y señalar en cada uno de ellos los periodos característicos Durante El Proceso De Secado:

- Periodo de velocidad constante
- Periodo de velocidad decreciente
- Segundo periodo de velocidad decreciente

7.6 Ajuste de la curva de secado a un modelo analítico

Con los resultados obtenidos se procede a verificar cuál modelo cinético se ajusta y describe mejor el comportamiento del secado de fresa. Los modelos analíticos a usar se muestran en la **Tabla 7**, que son los mayormente utilizados para el ajuste de curvas de secado de alimentos.

Tabla 7. Modelos analíticos de ajuste de datos.

ECUACIÓN	MODELO
$MR = \exp(-kt^n)$	Page
$MR = \exp[-(kt)^n]$	Page Modificado
$MR = a * \exp(-kt) + c$	Logarítmico
$MR = 1 + at + bt^2$	Wang y Singh
$MR = a - b * \exp(-k(t)^n)$	Weibull

Estos modelos se constituyen de la relación de humedad denominada MR en función del tiempo, donde se requiere el cálculo de la humedad en base seca W (ecuación 2) en un tiempo

determinado, la humedad de equilibrio W_e (humedad final del alimento) y la humedad inicial de la fresa W_o (mediante la termobalanza) como se observa en la ecuación 17.

$$MR = \frac{W - W_e}{W_o - W_e} \quad (17)$$

El ajuste se realizó mediante el software DataFit con su prueba de 30 días utilizado principalmente para regresiones lineales y modelado matemático.

7.7 Evaluación de la radiación UV dentro de los secadores solares

En los secadores de acrílico y policarbonato celular transparente, se colocó dentro de ellos un biómetro (mostrado en la **Tabla 3**) para determinar el valor de la radiación UV que logró pasar dentro de ellos. Con las mediciones de la radiación UV obtenidas, se realizaron promedios por hora y se compararon entre los distintos secadores, así como la radiación UV fuera de ellos.

7.8 Evaluación de la radiación UV exterior

Para la evaluación de la radiación UV durante la experimentación, se tomaron las mediciones de la Estación Solarimétrica de Zacatecas ubicada en el Campus UAZ SXXI la cual arroja los valores en unidades de MED/hora, por lo que se hizo su transformación a W/m^2 . Los datos presentados en gráficos en conjunto con la radiación UV interna de los secadores:

 Comportamiento promedio de la radiación UV en el transcurso del día.

7.9 Análisis Estadístico

Los resultados de la determinación del contenido fenólico, antocianinas, ácido ascórbico, índice de coloración, cambio de coloración, humedad inicial y actividad de agua se expresaron como medias $\pm$ desviaciones estándar.

Se realizó un análisis estadístico para identificar las diferencias estadísticamente significativas de los compuestos bioactivos y, cambio de coloración fresa fresca y deshidratada según el método de secado. Primero, se aplicó una prueba de normalidad de Anderson-Darling y D'Agostino-Pearson para conocer si los datos fueron paramétricos o no paramétricos, seguido de su análisis estadístico descriptivo. Se realizó una comparación de dos grupos, los resultados de la fresa fresca respecto a los de la fresa deshidratada. Para datos paramétricos se aplicó una prueba t ($p \leq 0.05$). En caso de datos no paramétricos, se utilizó una prueba de Mann-Whitney ($p \leq 0.05$).

Posteriormente, se realizó una comparación entre cada uno de los métodos de secado empleados y los de la fresa fresca. Para datos paramétricos, se empleó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía con prueba de múltiples comparaciones de Dunnett ($p \leq 0.05$). En el caso de datos no paramétricos, se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis con múltiples comparaciones de Dunn's ($p \leq 0.05$).

Finalmente, para realizar una comparación de cada método de secado por estacionalidad, se utilizó un análisis de varianza de dos vías (ANOVA) con múltiples comparaciones de Šídák ($p \leq 0.05$).

Todos los análisis se realizaron en el programa GraphPad Prism versión 8.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Determinación de las propiedades fisicoquímicas de la fresa

Contenido de humedad inicial

La determinación del contenido de humedad de las fresas se determinó como se describe en la sección 7.2.

En la termobalanza se muestran distintos tipos de configuraciones de prueba, se usó A90 para una pérdida de humedad lenta debido a la formación de costras superficiales. Esta prueba termina cuando no se tiene una variación de peso <1 mg en 90 segundos, una vez finalizada la determinación de humedad se registran los datos de humedad y tiempo. En un estudio realizado sobre la capacidad antioxidante y compuestos bioactivos de distintas frutas por Téllez *et al.* (2024), reportaron una humedad para la fresa del 91.9%. En el presente estudio se obtuvo una humedad del 92.85% para agosto del 2024 y 91.97% para febrero del 2025, siendo similares a las reportadas en la literatura. Los resultados para ambos periodos de experimentación se muestran en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Humedad inicial de la fresa.

Variable	Valor	
	Agosto 2024	Febrero 2025
Humedad inicial (%)	92.85 $\pm$ 0.3262 [#]	91.77 $\pm$ 1.203 [#]
Peso de la muestra (g)	1.833 $\pm$ 0.0577 [#]	2.933 $\pm$ 0.1528 [#]
Tiempo (min)	82.33 $\pm$ 2.333 [#]	77.33 $\pm$ 2.517 [#]

[#] Los datos son representados como Media $\pm$ SD.

La actividad de agua (a_w) inicial de las fresas fue de 0.977 para ambos periodos de experimentación, como se observa en la **Tabla 9**. Este valor es consistente con los resultados reportados por Macedo *et al.* (2022) en su estudio sobre secado por aire caliente de fresas frescas e impregnadas con isomaltosa. Así como los de Ozcelik *et al.* (2022) en su investigación sobre el efecto de la maceración carbónica en el deshidratado de fresa, quienes registraron valores de a_w de 0.99 y 0.98 respectivamente.

Tabla 9. Actividad de agua de las fresas frescas y deshidratadas en agosto del 2024 y en febrero del 2025.

	Actividad de agua (A_w)	
	Agosto 2024	Febrero 2025
Fresa fresca	0.977±0.005 [#]	0.977±0.005 [#]
Aire caliente (60°C)	0.280±0.010 [#]	0.287±0.011 [#]
Acrílico CN	0.383±0.005 [#]	0.317±0.005 [#]
Acrílico CF	0.307±0.011 [#]	0.337±0.015 [#]
Polycarbonato CN	0.407±0.005 [#]	0.240±0.010 [#]
Polycarbonato CF	0.333±0.005 [#]	0.360±0.005 [#]

Los datos son representados como Media±SD.

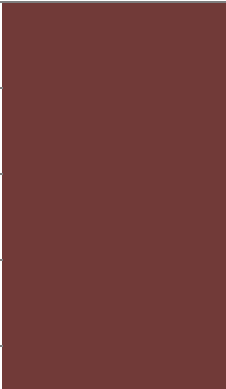
En la experimentación realizada en agosto, el valor más bajo de a_w más se obtuvo para las fresas del secado por aire caliente, con un valor de 0.280 y el más alto para el secador solar de polycarbonato a convección natural de 0.407. En cambio, durante la experimentación de febrero, las fresas deshidratadas mediante el secador solar de polycarbonato por convección natural alcanzaron la menor a_w de 0.240 y la más alta de 0.360 en el mismo secador, pero por convección forzada. Todos estos valores se encuentran por debajo de la a_w mínima de 0.6, inhibiendo el crecimiento de microorganismos que deterioran el alimento según lo descrito por Domínguez-Niño *et al.* (2024) en su estudio sobre la evaluación térmica de un secador mixto en el deshidratado de plantas medicinales.

Índice de coloración de las fresas frescas

El cambio de coloración de las fresas antes y después del deshidratado en los diferentes métodos de secado, así como el índice de coloración de las fresas frescas para asegurar un mismo estado de maduración inicial se determinó como se describe en la sección 7.2.

El índice promedio de la coloración de las fresas utilizadas para el deshidratado en los periodos de verano e invierno, pueden observarse en las **Tablas 10 y 11** cada uno de los parámetros L (blanco-negro), a (rojo-verde), b (azul-amarillo), C (saturación cromática) y H (ángulo de tono) así como la descripción de cada uno.

Tabla 10. Índice promedio de coloración de las fresas (agosto del 2024).

	Valor	Descripción	Color
L	31.60±3.120 [#]	Luminosidad baja, indicando un color oscuro.	
a	24.75±2.074 [#]	Valor positivo con tendencia hacia el color rojo.	
b	12.81±3.328 [#]	Valor positivo con tendencia al color amarillo.	
C	28.06±3.313 [#]	Color moderadamente intenso y saturado.	
H	26.54°±4.217° [#]	Tonalidad cercana al rojo puro.	

Los datos son representados como Media±SD.

Tabla 11. Índice promedio de coloración de las fresas (febrero del 2025).

	Valor	Descripción	Color
L	38.46±3.644 [#]	Luminosidad baja, indicando un color oscuro.	
a	25.60±3.444 [#]	Valor positivo con tendencia hacia el color rojo.	
b	21.40±2.559 [#]	Valor positivo con tendencia al color amarillo.	
C	33.52±4.285 [#]	Color brillante y saturado.	
H	39.84°±0.856° [#]	Tonalidad cercana al rojo puro.	

Los datos son representados como Media±SD.

El índice de coloración de las fresas fue más oscuro en la experimentación realizada en agosto del 2024 en comparación con las fresas de invierno, febrero del 2025. Esta diferencia se puede apreciar con la saturación cromática, un parámetro describe la intensidad o pureza de un color y en el parámetro L, al ser mayor que el de las muestras de verano con un valor de 38.46, tiene una tendencia hacia el color blanco (mayor luminosidad). En agosto, las fresas presentaron un color rojo moderadamente intenso y saturado, mientras que en febrero exhibieron un color rojo más brillante y saturado, indicando una pigmentación más llamativa durante la temporada de invierno.

Cambio de coloración total

En la **Tabla 12** se presenta el cambio total de coloración (ΔE) de las fresas deshidratadas en agosto del 2024 para cada tipo de secador, junto con los colores iniciales y finales de las muestras de fresa y sus códigos HEX correspondiente. Un valor bajo de ΔE indica un menor cambio en la coloración durante el proceso de deshidratado. En este sentido, el secador de policarbonato por convección forzada registró el valor más bajo de ΔE , con 14.35, seguido del secado por aire caliente con un valor de 15.19. De forma contraria, el mayor cambio de color se observó en el secador de acrílico por convección natural, con un ΔE de 27.27, indicando una mayor alteración cromática en las fresas.

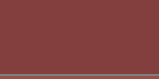
Tabla 12. Cambio total de coloración de la fresa (agosto del 2024).

Tipo de secador	HEX inicial	Color inicial	HEX final	Color final	Cambio total de coloración (ΔE)
Aire caliente	905B56		8F4C3D		15.19±2.014 [#]
Acrílico CN	9B655E		6B391C		27.27±2.623 [#]
Acrílico CF	975D55		61281D		22.36±1.796 [#]
Policarbonato CN	98635B		995846		17.06±0.9669 [#]
Policarbonato CF	9C675E		9C6147		14.35±2.999 [#]

[#] Los datos son representados como Media±SD.

Se observa en la **Tabla 13** que, en las fresas deshidratadas en febrero del 2025, el mayor cambio de coloración total (ΔE) se registró para las fresas deshidratadas por aire caliente a 60°C de 21.72, siendo la mayor alteración de color de todos los métodos de secado empelados. En contraste, el menor ΔE se obtuvo en las fresas deshidratadas utilizando el secador solar de policarbonato por convección natural, con un valor de 13.41, preservando mayormente el color inicial de las fresas bajo estas condiciones. Las fresas deshidratadas en los secadores solares por convección forzada de acrílico y policarbonato obtuvieron valores muy similares de ΔE de 19.12 y 19.28 respectivamente.

Tabla 13. Cambio total de coloración de la fresa (febrero del 2025).

Tipo de secador	HEX inicial	Color inicial	HEX final	Color final	Cambio total de coloración ΔE
Aire caliente	946F65		913B39		21.72±5.810 [#]
Acrílico CN	926A60		793A36		18.72±2.072 [#]
Acrílico CF	A2746B		7E3E3B		19.12±5.306 [#]
Polycarbonato CN	925F54		833E3E		13.41±6.522 [#]
Polycarbonato CF	9E776D		99504B		19.28±4.789 [#]

[#] Los datos son representados como Media±SD.

Sin embargo, en todos los métodos de secado empleados y en ambos periodos de experimentación el ΔE de las muestras es mayor a 3, indicando diferencias bastante perceptibles en su cambio de color en comparación a la inicial. Según (López-Ortiz et al., 2024), cuando el ΔE es mayor a 3, existe una diferencia apreciable en el color de la muestra; cuando ΔE se encuentra entre 1.5-3, se perciben diferencias de color; y cuando $\Delta E < 1.5$, no existe una diferencia significativa de color entre las muestras.

La **Figura 32** muestra la comparación del cambio de color total (ΔE) entre las fresas deshidratadas mediante los distintos métodos de secado evaluados. Los resultados indican que las fresas deshidratadas en la experimentación de agosto del 2024, mediante los secadores de acrílico a convección natural y forzada mostraron un ΔE significativamente mayor respecto a las del secado por aire caliente, evidenciando una mayor alteración de color. Asimismo, el secador solar de acrílico por convección natural presentó un valor de ΔE de 27.27, significativamente mayor en comparación con los secadores solares de polycarbonato para ambos sistemas de convección, resaltando la influencia del material de la cubierta en la estabilidad final del color de la fresa. Este comportamiento también se puede apreciar en los secadores solares por convección forzada, donde hubo una diferencia significativa entre ellos, presentándose el polycarbonato con el menor ΔE , confirmando su capacidad de preservar el color frente al de acrílico.

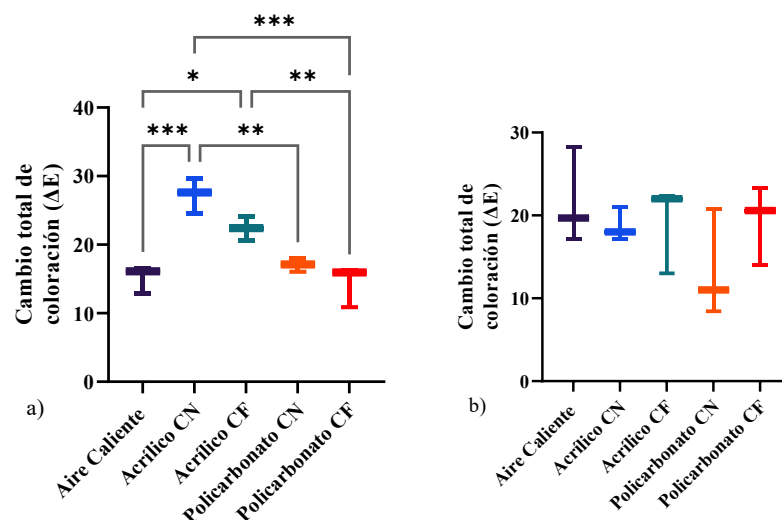


Figura 32. Cambio de color de las fresas deshidratadas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante Kruskal-Wallis con una prueba de múltiples comparaciones de Dunn's, tomando como significativo * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, **** $p < 0.0001$.

Sin embargo, para las fresas deshidratadas en los diferentes métodos de secado durante febrero del 2025, no mostraron diferencia significativa entre ellos en el ΔE . Este resultado podría atribuirse a las altas desviaciones estándar observadas durante la medición del color final, sin embargo, el menor ΔE medido se presentó para el secador de policarbonato por convección natural con un valor de 13.41.

Al comparar ambos periodos de experimentación (agosto 2024 y febrero 2025), se observa en la **Figura 33** que el secador solar de policarbonato por convección natural y el secador de aire caliente presentaron el menor ΔE en verano en relación con el de invierno, indicando una mayor estabilidad en dicho periodo. En contraste, el secador solar de acrílico por convección natural mostró un mayor valor de ΔE de 27.27 para el verano en comparación con el de invierno de 18.72. No obstante, al analizar de manera comparativa cada método de secado en ambos periodos de experimentación, no mostraron diferencias estadísticamente significativas. Esto puede atribuirse a las altas desviaciones estándar en las mediciones de color de las fresas deshidratadas en invierno, limitando apreciar esa diferencia entre los métodos de secado en los distintos periodos.

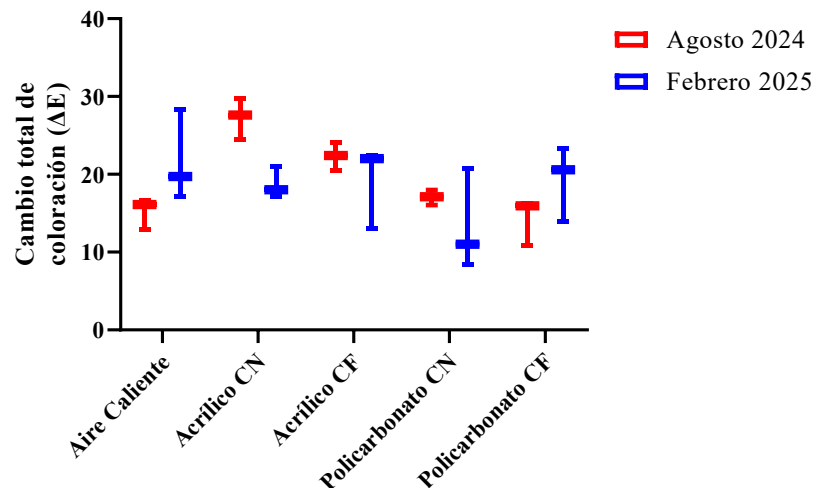


Figura 33. Comparación del ΔE para ambos periodos de experimentación. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante ANOVA de dos vías con múltiples comparaciones de Šídák, tomando como significativo * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ y **** $p < 0.0001$.

8.2 Cuantificación de fenoles totales, antocianinas y ácido ascórbico

Para determinar el contenido fenólico total tanto de las fresas frescas como deshidratadas, se utilizaron los datos obtenidos a partir de la curva de calibración construida de patrón de ácido gálico en un rango de concentraciones de 300-700 ppm. Se obtuvo la ecuación de la recta y el coeficiente de determinación $R^2 = 0.9951$, como se muestra en la **Figura 34**. Este valor de R^2 tiene valores cercanos a uno, por lo que representa una buena relación lineal de los datos como lo reporta Roustaei (2024) en su estudio de interpretación de regresiones lineales.

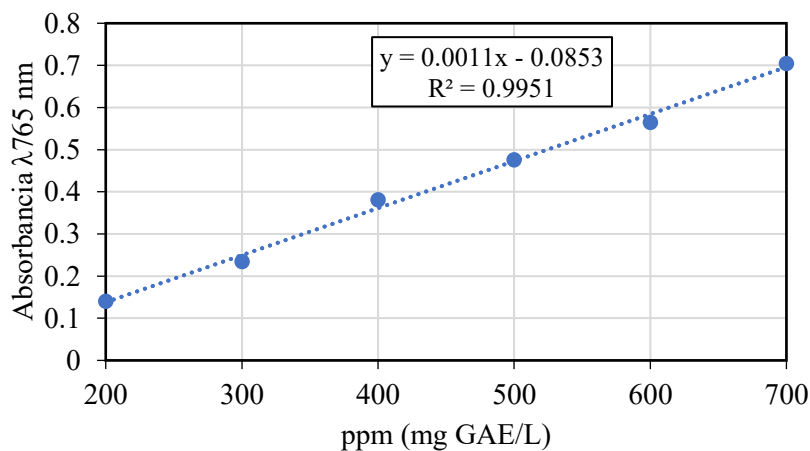


Figura 34. Curva de calibración para CFT

Fresas frescas

En la **Tabla 14** se puede observar el contenido promedio de fenoles totales, antocianinas y ácido ascórbico de la fresa fresca para ambos periodos de experimentación antes de someterse al proceso de deshidratación, los valores se expresan en base húmeda (b.h). Posteriormente, para su comparación con los diferentes métodos de secado, se convierte la base húmeda a base seca y sus valores se encuentran en las tablas del Anexo A.

Tabla 14. Contenido de fenoles totales, antocianinas totales y ácido ascórbico promedio de la fresa fresca.

	Fresa fresca	
	Agosto 2024	Febrero 2025
Contenido fenólico total (mg GAE/100 g)	42.30±1.035	26.42±1.073
Antocianinas totales (mg C3G/100 g)	57.90±4.252	37.23±4.073
Ácido ascórbico (mg AA/100g)	49.88±7.575	42.08±3.070

Los datos son representados como Media±SD

Sadik *et al.* (2023) determinaron el contenido de fenoles totales en fresas comerciales, obteniendo valores que oscilaron entre 61-151 mg GAE/100 g. De manera similar, Milosavljević *et al.* (2020) analizaron 12 variedades de fresa, reportando un rango de 46 a 107 mg GAE/100 g. Por su parte, Téllez *et al.* (2024) encontraron un contenido de 64 mg GAE/100 g. En comparación, en el presente estudio se obtuvo un contenido promedio de fenoles totales para las fresas de agosto del 2024 de 42.30 mg GAE/100 g y 26.42 mg GAE/100 para la experimentación de febrero del 2025, los cuales se encuentran por debajo del límite inferior de los valores reportados en estudios previos. La variación en el contenido total de los compuestos fenólicos puede estar relacionada tanto con la variedad de fresa analizada como las condiciones de cultivo a las que fue sometida.

En cuanto al contenido de antocianinas, Parra-Palma *et al* (2020) evaluaron cuatro variedades de fresa en distintos estados de madurez, observando una mayor concentración de 15-30 mg C3GE/100 g en la madurez comercial. Milosavljević *et al.* (2020), reportaron un rango de 3-15 mg C3GE/100 g en 12 variedades de fresa, mientras que Dzhanfezova *et al.* (2020)

observaron un contenido mayor entre 38-162 mg C3GE/100 g en fresas cosechadas en 2014-2015. En el presente estudio, el contenido promedio de antocianinas totales fue de 57.90 mg C3GE/100 g para las fresas de agosto del 2024, un valor intermedio en relación a la literatura consultada. Para las fresas de febrero del 2025, el contenido promedio de antocianinas fue de 37.23 mg C3G/100 g, un valor más bajo en comparación a las fresas de agosto y debajo del límite inferior del estudio realizado por Dzhanfezova de 15 mg C3GE/100 g, pero más altos que los estudios reportados por Parra-Palma de 15-30 mg C3GE/100 g y Milosavljević de 15 mg C3GE/100 g. La variación en el contenido de las antocianinas totales puede atribuirse tanto al estado de maduración de las fresas como a la sensibilidad de estos compuestos frente a las condiciones ambientales como temperatura, oxígeno y luz durante su cuantificación.

Respecto al contenido de ácido ascórbico (AA), literatura informa que el contenido promedio en la fresa es de aproximadamente 56.7 mg de AA por cada 100 g, según lo reportado por M. E. P *et al.* (2023) y el sitio web de Botanical online. Turmanidze *et al.* (2017) obtuvieron valores entre 42.1-52.8 mg de AA por 100 g, mientras que Téllez *et al.* (2024) informaron un contenido de 52.65 mg de AA por 100 g. En el presente estudio se obtuvo un valor promedio de 49.88 mg AA/100 g en las fresas de agosto del 2024 y de 42.08 para la experimentación de febrero del 2025, los cuales se encuentran dentro del rango reportado por Turmanidze de 42.1-52.8 mg de AA por 100 g. Las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo el cultivo, el grado de madurez de la fresa, la variedad específica y la temperatura ambiente durante la cuantificación son factores clave que afectan en la cantidad de ácido ascórbico presente en la fruta. Estas variables pueden provocar una modificación significativa en los niveles de ácido ascórbico, lo que puede explicar las variaciones observadas en los resultados obtenidos de su cuantificación.

Fresas deshidratadas

A continuación, se presentan y analizan los resultados de la cuantificación de los compuestos bioactivos en las fresas deshidratadas, expresados en base seca (b.s). Los valores detallados se encuentran en las tablas del Anexo A para ambos periodos de experimentación. Estos parámetros permiten evaluar el impacto de los diferentes métodos de secado empleados en la calidad final de la fresa deshidratada.

Contenido fenólico total (CFT)

La **Figura 35** muestra que el contenido fenólico total de las fresas deshidratadas presentó diferencias significativas respecto a las fresas frescas en todos los métodos de secado utilizados, tanto en agosto como en febrero. Para el periodo de febrero, las muestras presentaron un mayor contenido fenólico en comparación con las de agosto, no obstante, en ambos casos se observó un incremento similar después de su deshidratación siendo el más alto de 172.4 y 170.7 mg GAE/100 g_{ss} para agosto y febrero respectivamente.

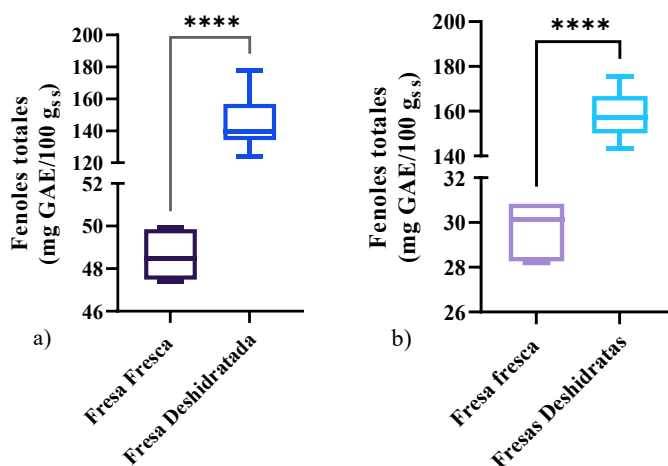


Figura 35. Comparación del contenido fenólico total de las fresas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante una prueba de Mann-Whitney, tomando como significativo * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, **** $p < 0.0001$.

Al comparar el contenido fenólico entre los distintos métodos evaluados, la **Figura 36** muestra que las fresas deshidratadas en agosto del 2024 mediante el secador solar de policarbonato por convección natural alcanzaron el mayor incremento, con un valor de 172.4 mg GAE/100 g_{ss}. Este método de secado presentó diferencias significativas respecto a los secadores de acrílico, logrando una mayor conservación de los compuestos fenólicos. En este sentido, el tipo de cubierta empleada para el deshidratado de fresas muestra una influencia significativa en la conservación de estos compuestos bioactivos, siendo el policarbonato más eficaz respecto al de acrílico.

Por el contrario, las fresas deshidratadas utilizando el secador por aire caliente en febrero del 2025, reportaron un mayor incremento en el contenido fenólico total, alcanzando un valor de

170.7 mg GAE/100 g_{ss}, siendo superior al obtenido en los secadores solares. Al tener una temperatura de operación de 60°C, no se ve influenciada por la variación de la radiación solar a lo largo del día ni por las fluctuaciones de la temperatura ambiente, a diferencia de lo que ocurre con los secadores solares. Además, este secado mostró diferencias significativas respecto al secador solar acrílico por convección forzada, resaltando la influencia de las condiciones ambientales de febrero (invierno) en el proceso de deshidratado.

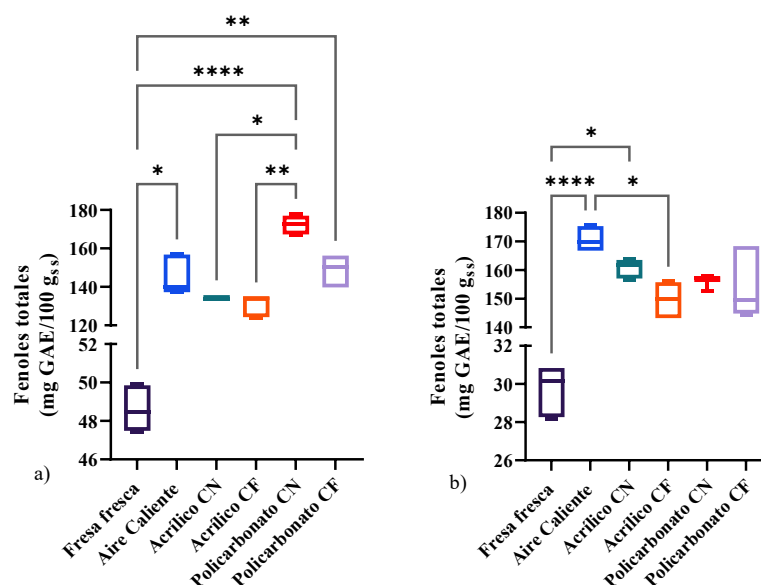


Figura 36. Contenido fenólico total de fresas deshidratadas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante Kruskal-Wallis con una prueba de múltiples comparaciones de Dunn's, tomando como significativo * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, **** $p < 0.0001$.

Durante el periodo de agosto, las fresas deshidratadas mediante el secador solar de policarbonato por convección forzada registraron un incremento del 2.90% del contenido fenólico total en comparación con el secado por aire caliente. No obstante, el mayor incremento de estos compuestos se observó también en el mismo secador, pero por convección natural, alcanzando un aumento del 19.22% respecto al de aire caliente.

En contraste, en el periodo de febrero, las fresas deshidratadas con el secador solar de policarbonato por convección forzada mostró una disminución del 9.66% del contenido fenólico total en comparación con el de aire caliente. De manera similar, el mismo secador por convección natural presentó una disminución del 8.26% respecto al de aire caliente, mostrando el efecto de las condiciones invernales en la retención de estos compuestos.

Este aumento de fenoles totales en las fresas deshidratadas puede atribuirse al efecto del proceso de secado, ya sea por aire caliente o solar, que favorece la liberación de estos compuestos bioactivos desde la matriz vegetal. Esto se debe al daño de la estructura celular inducidos por el secado como lo menciona el estudio realizado por Kwaśniewska (2021), donde el romero mediante el secado convectivo a 30°C obtuvo el mayor contenido de compuestos fenólicos de 639 mg GAE/100 g_{ss} a 2019 mg GAE/100 g_{ss}. Por su parte, Domínguez *et al.* (2024) evaluaron el efecto de la radiación solar, empleando una malla sombra para proteger el producto de la exposición directa, sobre la capacidad antioxidante de la planta medicinal *Agastache mexicana*, observando un aumento del 63% al 93%. Adicionalmente, Domínguez *et al.* (2025) deshidrataron *Tagetes erecta* L. en un secador solar mixto, los datos reportaron mostraron un pequeño aumento del contenido fenólico de 28.06 mg GAE/100 g_{ss} a 28.488 mg GAE/100 g_{ss}.

Kwaśniewska (2021) y Domínguez *et al.* (2024) han propuesto que las altas temperaturas alcanzadas durante el secado pueden llegar a inhibir la acción de enzimas prooxidantes presentes en los alimentos, así como favorecer las reacciones de Maillard que también contribuyen a la formación de compuestos que muestran actividad antioxidante.

En la **Figura 37** se presenta el contenido fenólico total de las fresas en los diferentes métodos de secado, junto con su contenido inicial. Al comparar ambos periodos, se observa una gran variación en el contenido fenólico inicial de las muestras frescas, registrando los valores más bajos en febrero. Esta puede atribuirse a la menor cantidad de radiación solar recibida en invierno, que limita el crecimiento y retrasa la maduración del fruto, afectando la biosíntesis de los compuestos fenólicos totales. Los resultados son consistentes con lo reportado por Li *et al.* (2021), quienes demostraron que la exposición a la radiación UV antes de la cosecha favorece la maduración de los frutos y la biosíntesis de los compuestos bioactivos. En concordancia, durante febrero (invierno) en el estado de Zacatecas se recibe una menor radiación UV (Sección 2.1.4), lo cual se refleja en una menor acumulación del contenido fenólico de la fresa fresca utilizada en el presente estudio.

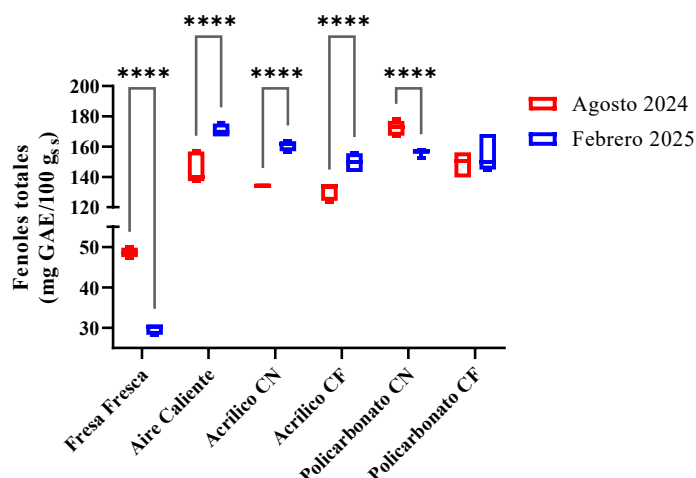


Figura 37. Comparación del contenido fenólico total para ambos periodos de experimentación. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante ANOVA de dos vías con múltiples comparaciones de Šidák, tomando como significativo * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ y **** $p < 0.0001$.

Sin embargo, a pesar de que en agosto las fresas presentaron un mayor contenido fenólico, en la experimentación de febrero se observó un incremento más notable de estos compuestos para los secadores solares de acrílico y el secador por aire caliente, con diferencias significativas en ambos periodos. En contraste, en los secadores solares de policarbonato, el mayor aumento se registró en el sistema de convección natural, mientras que en el de convección forzada no hubo diferencias significativas. Los resultados destacan la importancia del uso del policarbonato en la preservación de estos compuestos fenólicos durante el proceso de deshidratado de fresa.

🌈 Antocianinas totales (AT)

En la **Figura 38** se presenta la comparación del contenido total de antocianinas inicial con los diferentes métodos de secado utilizados en agosto del 2024 y febrero del 2025, evidenciando diferencias significativas en ambos periodos. Se destaca que el mayor contenido inicial fue para agosto, con un valor de 66.54 mg C3GE/100 g_{ss}, en comparación con el de febrero, con un valor de 41.90 mg C3GE/100 g_{ss}. No obstante, en ambos casos se registró una disminución del contenido de antocianinas totales después del deshidratado, independiente del tipo de secador utilizado.

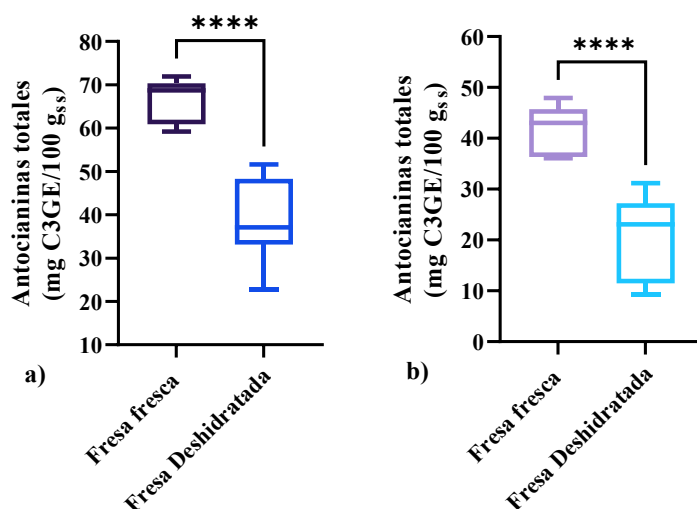


Figura 38. Comparación de las antocianinas totales en las fresas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante una prueba de Mann-Whitney, tomando como significativo * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, **** $p < 0.0001$.

La **Figura 39** muestra la comparación del contenido de antocianinas totales de las fresas deshidratadas y de la fresa fresca. Durante la experimentación de agosto del 2024, las fresas deshidratadas mediante los secadores de acrílico presentaron la mayor pérdida de antocianinas, especialmente por convección natural, seguido de convección forzada. Las fresas deshidratadas mediante el secador de policarbonato por convección forzada y secado por aire caliente no mostraron diferencias significativas respecto al contenido inicial. Estos secadores obtuvieron la menor pérdida de antocianinas, conservando un contenido de 51.67 y 46.18 mg C3GE/100 g respectivamente, un valor cercano al de las fresas frescas de 57.90 mg C3GE/100 g.

En la experimentación de febrero del 2025, el secado por aire caliente y el secador solar de policarbonato por convección natural exhibieron las menores pérdidas en el contenido de antocianinas, con valores de 28.25 y 26.71 mg C3GE/100 g_{ss} respectivamente. Ambos métodos no mostraron diferencias significativas en relación al contenido inicial, demostrando su eficacia para la preservación de estos compuestos. Las diferencias observadas en ambos periodos podrían atribuirse a las variaciones de las condiciones ambientales, como una menor cantidad de radiación UV recibida y a las bajas temperaturas del aire durante el invierno (Sección 2.1.4).

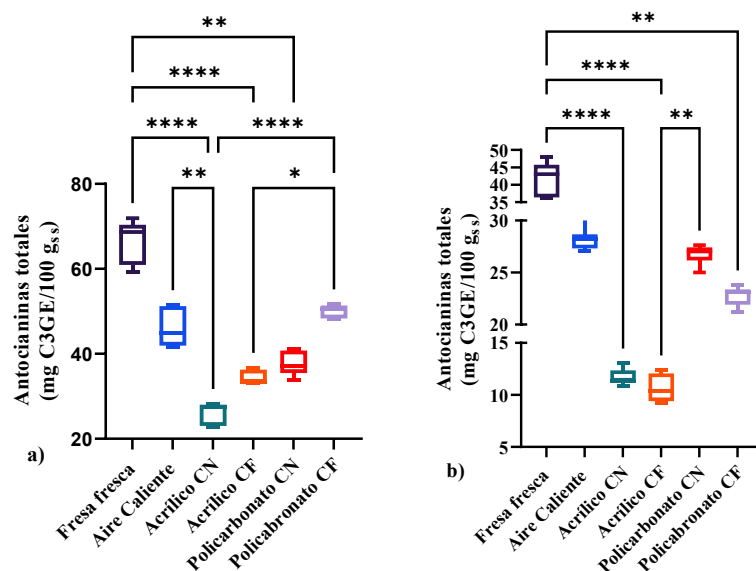


Figura 39. Antocianinas totales en las fresas deshidratadas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante Kruskal-Wallis con una prueba de múltiples comparaciones de Dunn's, tomando como significativo * $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$, **** $p<0.0001$.

En comparación con el secado por aire caliente, las fresas deshidratadas mediante el secador solar de policarbonato por convección forzada, muestran una mayor conservación de las antocianinas totales del 11.88% en la experimentación de agosto. Por el contrario, las fresas deshidratadas en el secador solar por convección forzada prestaron una disminución del 5.45% respecto a las del secado por aire caliente de antocianinas totales.

El mayor cambio de coloración se observó en las fresas deshidratadas con los secadores de acrílico transparente, fenómeno asociado a la disminución de las antocianinas, compuestos encargados de otorgar el color rojo característico a las fresas, siendo la pelargonidina 3-glucósido con mayor abundancia entre el 52%-90% según Arias (2023). Estos compuestos bioactivos son sensibles a factores como la temperatura y especialmente la radiación UV. Estudios previos realizados por Serrano (2020), confirma que el acrílico es un material que permite un alto paso de radiación UV, lo que puede afectar la estabilidad del contenido de antocianinas totales en la fresa. En contraste, el policarbonato celular transparente puede bloquear gran parte la radiación UV que incide, preservando las antocianinas totales y obteniendo una menor alteración en el cambio de color final de las fresas deshidratadas. Los resultados concuerdan con el estudio realizado por Rodríguez-Ramírez *et al.* (2021), donde

probaron diferentes cubiertas en un secador solar directo sobre el contenido de antocianinas, destacando al policarbonato como la cubierta que más retuvo el contenido en un 15%.

La **Figura 40** muestra la comparación de las antocianinas totales entre cada método de secado, mostrando diferencias significativas entre los periodos de experimentación de agosto y febrero. Los resultados reflejan la influencia de la estacionalidad del cultivo de fresa, ya que durante el invierno al recibir menor radiación solar limita la biosíntesis de los compuestos bioactivos presentes en la fresa. Zhu *et al.* (2023) evaluaron el tratamiento previo a la cosecha de 1 a 2 horas con lámparas UV en fresas para mejorar su calidad después de las horas de Sol, obteniendo un incremento en el contenido de antocianinas respecto a las que no fueron tratadas. Los resultados del previo estudio reportan una disminución de las antocianinas totales para la experimentación de febrero, época en la que la radiación UV disminuye comparado con el verano como se describe en la sección 2.1.4.

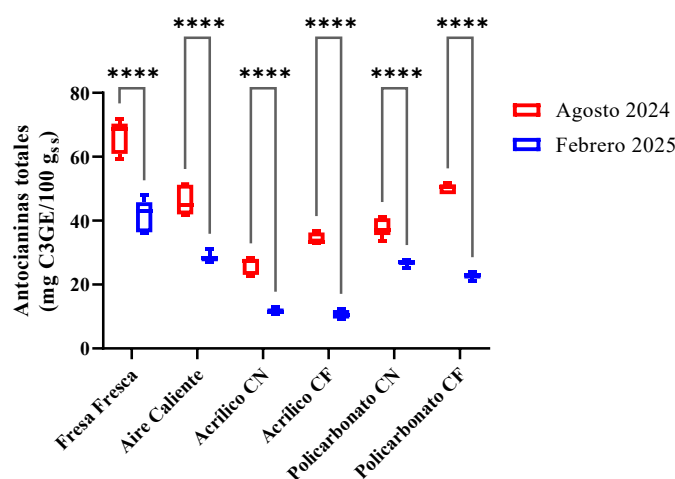


Figura 40. Antocianinas totales para ambos periodos de experimentación. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante ANOVA de dos vías con múltiples comparaciones de Šídák, tomando como significativo * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ y **** $p < 0.0001$.

🌈 Ácido Ascórbico (AA)

En la **Figura 41** se puede observar que en los métodos de secado empleados en ambos periodos de experimentación presentan una diferencia significativa respecto al contenido inicial de ácido ascórbico de las fresas. De igual forma que los fenoles y las antocianinas

totales, el mayor contenido de ácido ascórbico se obtuvo en la experimentación de agosto con un valor de 57.33 mg AA/100 g_{ss}, pero también presenta la mayor desviación estándar en las muestras analizadas. Esto podría explicarse a que el ácido ascórbico es sensible a las altas temperaturas, la luz o el oxígeno al que se expone durante su análisis, siendo la época de agosto donde se presentan las temperaturas más altas.

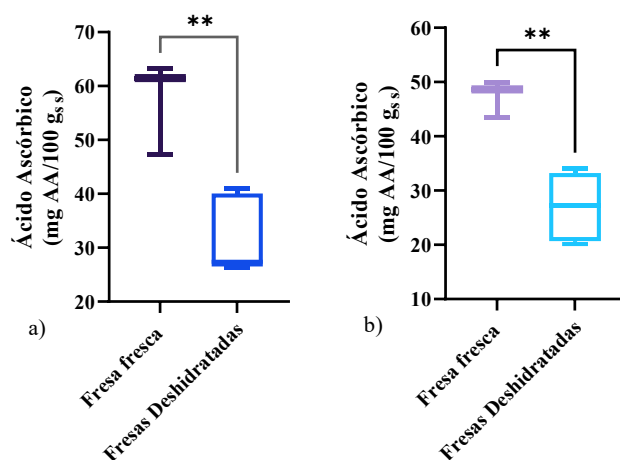


Figura 41. Comparación del ácido ascórbico en las fresas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante una prueba de Mann-Whitney, tomando como significativo * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, **** $p < 0.0001$.

La **Figura 42** muestra la comparación del ácido ascórbico entre los métodos de secado y el contenido inicial en las rodajas de fresa. Los resultados mostraron que según el método de secado influye significativamente la preservación del contenido de ácido ascórbico (AA) de la fresa deshidratada, mostrando una variación de su contenido respecto a la época del año. Durante agosto del 2024, los secadores solares de policarbonato no presentaron alguna diferencia significativa respecto al de la fresa fresca. Estos resultados indican una menor degradación de AA, con valores de 40.27 mg AA/100 g en convección natural y 40.24 mg AA/100 g en convección forzada, mientras que en los secadores de acrílico se observaron las mayores pérdidas al mostrar diferencias significativas en comparación al contenido inicial.

Por el contrario, en febrero del 2025 no se observaron diferencias significativas en ninguno de los secadores y de la fresa fresca. Sin embargo, el mayor contenido de ácido ascórbico se reporta en el secador por aire caliente y el secador solar de policarbonato por convección natural, mientras que en los secadores por convección forzada fue menor el ácido ascórbico.

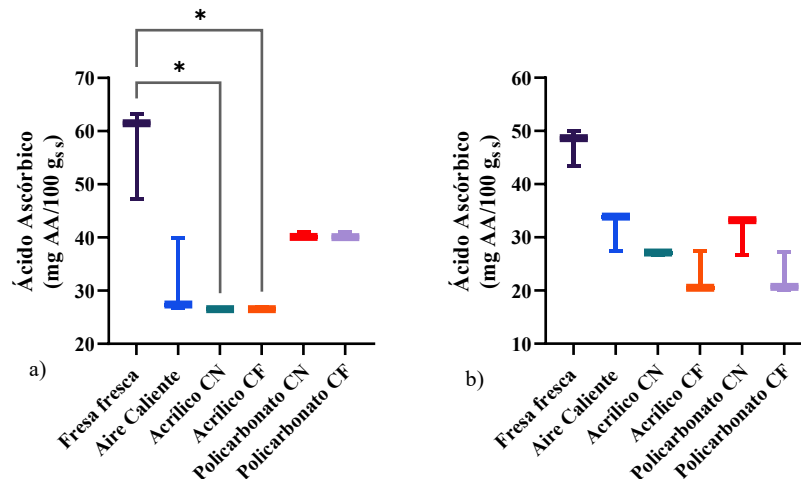


Figura 42. Contenido de ácido ascórbico en las fresas deshidratadas: a) agosto 2024 y b) febrero 2025. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante: a) ANOVA de una vía con post-test de Dunnett y b) Kruskal-Wallis de una vía con post-test de Dunn's tomando como significativo * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, **** $p < 0.0001$.

El contenido de ácido ascórbico tuvo una mayor conservación del 28.61% en las fresas deshidratadas para los secadores solares de policarbonato con ambos tipos de convección de aire (natural y forzada) respecto a las deshidratadas en el secador por aire caliente en agosto. De forma contraria, en el periodo de febrero el secador solar de policarbonato por convección forzada, mostró una disminución del ácido ascórbico del 28.62% en comparación al secador por aire caliente.

La fresa es considerada una fruta rica en ácido ascórbico, pues el contenido en ella puede determinar la calidad de este alimento. Como compuesto termolábil y fotosensible, la descomposición a ácido deshidroascórbico se acelera por la exposición al oxígeno durante el deshidratado de fresa (Sección 2.2.2), la radiación UV que logra pasar en las cubiertas y a temperaturas elevadas que se puedan presentar. Esto concuerda con un estudio realizado por Kwaśniewska y Mostowski (2021), quien reportó una pérdida del 88% de AA en el romero deshidratado a 30°C por 4 horas. Asimismo, Mashitoa *et al.* (2021) estudiaron el efecto de distintos métodos de secado en los metabolitos secundarios de hojas de calabaza, los resultados mostraron una disminución del contenido inicial de AA (62.37 mg AA/100 g) en el secado solar y secado al sol de 39.78 y 37.63 mg AA/100 g respectivamente.

La **Figura 43** muestra la comparación del contenido de ácido ascórbico de las fresas deshidratadas en los periodos de agosto y febrero. Se observa una diferencia significativa únicamente en los secadores solares de policarbonato por convección forzada, siendo en agosto la mayor conservación del ácido ascórbico en relación a su contenido inicial. En contraste, en los demás métodos de secado no se observó alguna diferencia entre periodos, lo que destaca al policarbonato operando por convección forzada en la conservación de este compuesto sensible operando en condiciones óptimas de radiación solar, temperatura y tiempo de secado como las de agosto.

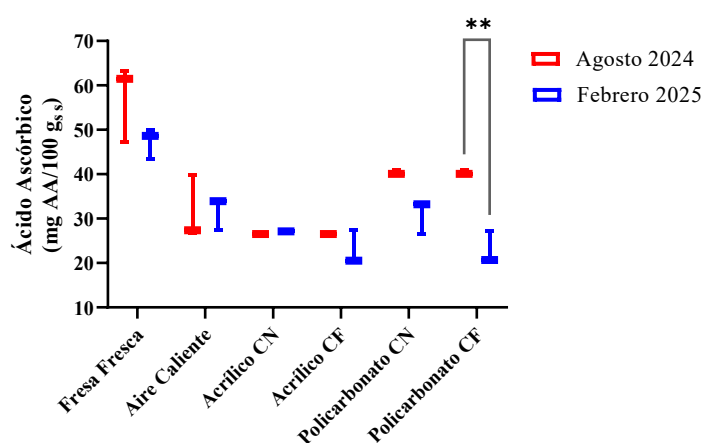


Figura 43. Comparación del ácido ascórbico para ambos periodos de experimentación. El análisis estadístico se llevó a cabo mediante ANOVA de dos vías con múltiples comparaciones de Šidák, tomando como significativo * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, **** $p < 0.0001$.

8.3 Obtención de la cinética de secado

Agosto del 2024

La distancia más larga de la Tierra respecto al Sol se tiene en el periodo de junio a septiembre, pero esto no significa que la energía solar recibida sea menor. El hemisferio norte se encuentra inclinado respecto al Sol provocando que sus rayos incidan de forma directa y más horas al día, provocando temperaturas significativamente más elevadas que en el invierno.

En la experimentación de agosto del 2024, el peso inicial de las muestras representativas de las rodajas de fresa proveniente de los distintos secadores osciló entre los 3.5 y 4.5 gramos

como se muestra en la **Figura 44**. Todos los métodos de secado requirieron un tiempo total de 5 horas, observándose una disminución progresiva del peso hasta estabilizarse a partir de los 240 minutos. Esta estabilización indica que las rodajas de fresa alcanzaron la humedad de equilibrio, marcando así la etapa final del secado, tal como se describe en la sección 2.4.1.

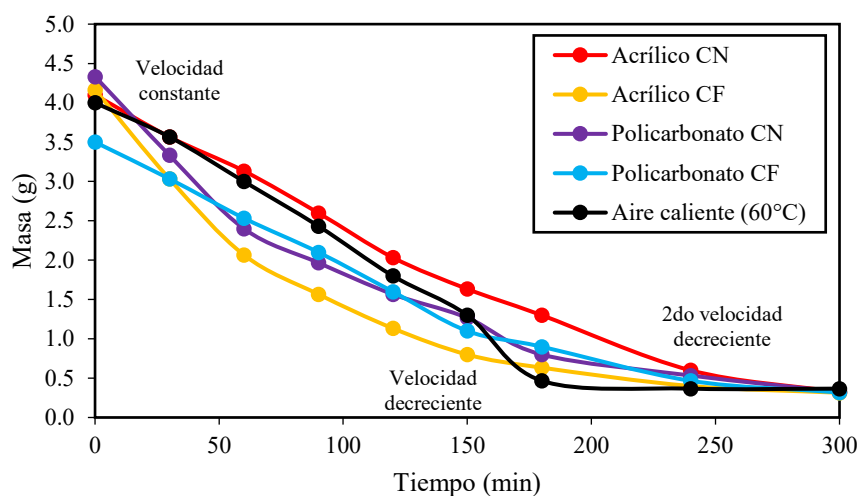


Figura 44. Disminución de masa de las fresas (agosto del 2024).

Los periodos característicos de la cinética de secado en función del peso como el periodo de velocidad constante, velocidad decreciente y de segunda velocidad decreciente, fueron más definidos para el secado por aire caliente y los secadores solares de policarbonato. En contraste, los secadores solares de acrílico no mostraron los periodos con misma claridad, ya que a partir de los 150 minutos se registró una disminución más pronunciada en la masa de las muestras, siendo este efecto especialmente notable para el secado por aire caliente a 60°C. La disminución de la masa de las muestras representativas de fresa fue más rápida para el secador solar de acrílico por convección forzada a partir de los 50 minutos donde se tenía el periodo de velocidad constante y hasta los 150 minutos donde se encontraba el periodo de velocidad decreciente. Esta mayor rapidez puede ser atribuible a la rápida circulación de aire dentro del secador y una mejor distribución de calor por la convección forzada. Sin embargo, a partir del inicio del periodo de la segunda velocidad decreciente (alrededor de los 180 minutos), el secador por aire caliente mostró una mayor eficiencia en la pérdida de masa en comparación con los secadores solares. Esa mayor eficiencia posiblemente esté relacionada con la capacidad del secador de aire caliente de mantener una temperatura de 60°C constante y más controlada. Por el contrario, los secadores solares de policarbonato mostraron

comportamientos similares entre sí en cuanto a la disminución de masa durante todo el proceso de deshidratación. Esto sugiere que el material de fabricación de los secadores solares influye en el secado de los alimentos, aunque su eficiencia es menor en el periodo de segunda velocidad decreciente en comparación con el secado por aire caliente.

Al inicio del proceso de secado, las fresas presentaban un contenido de humedad del 92.85% tal como se muestra en la **Figura 45**, al finalizar el proceso de deshidratado, las humedades variaron según el tipo de secador utilizado. El orden de menor a mayor humedad final en los distintos secadores fue el siguiente: secador por aire caliente a 60°C (8.72%), acrílico por convección forzada (9.01%), policarbonato por convección forzada (9.97%), acrílico por convección natural (11.09%), policarbonato por convección natural (11.55%).

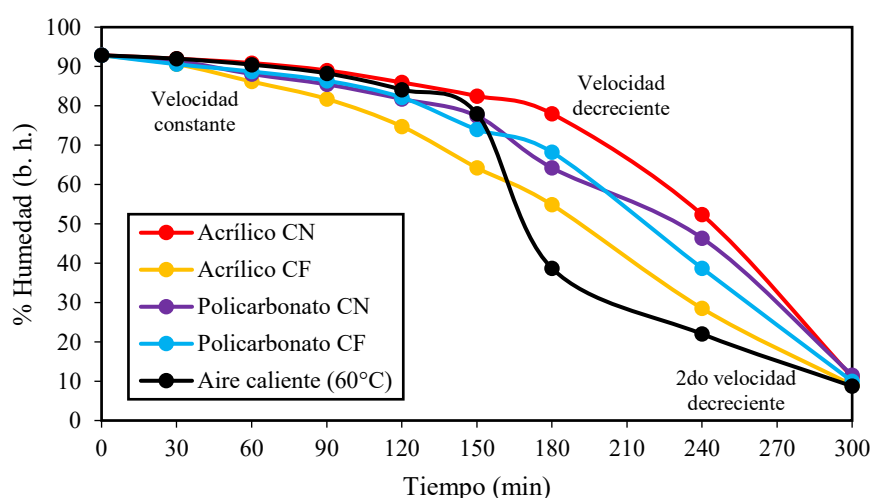


Figura 45. Disminución de humedad de las fresas (agosto del 2024).

Los primeros tres métodos, que utilizan la convección forzada o el secado por aire caliente, permitieron reducir el contenido de humedad a valores iguales o inferiores del 10%, valor límite en el que se considera un producto deshidratado microbiológicamente estable, según lo reportado por Vera Zambrano *et al.* (2019). De forma contraria, los secadores por convección natural no alcanzaron el valor límite de humedad final, lo que podría implicar un deterioro microbiológico más rápido y un menor tiempo de vida de anaquel del producto.

En la **Figura 46**, se presentan los distintos comportamientos de las velocidades de secado en función de la humedad en base seca, según el tipo de secador utilizado y del flujo de aire aplicado. En los secadores solares de policarbonato, tanto en convección natural como forzada, en la etapa inicial del proceso se observa una velocidad de secado constante que se mantiene hasta llegar a un valor de humedad en base seca (X_{bs}) de 10 g H₂O/g masa seca. Esta etapa corresponde al periodo de velocidad de secado constante, caracterizado por una tasa de secado constante estable y bien definida. En contraste, el secador solar de acrílico por convección forzada presenta comportamiento diferente en donde la velocidad de secado disminuye progresivamente a medida que se reduce la humedad en base seca durante todo el proceso de secado. Este comportamiento indica el predominio del periodo de velocidad decreciente durante la mayor parte del proceso, ya que la superficie no se encuentra saturada y la eliminación de humedad se ve dificultada por los mecanismos de difusión interna.

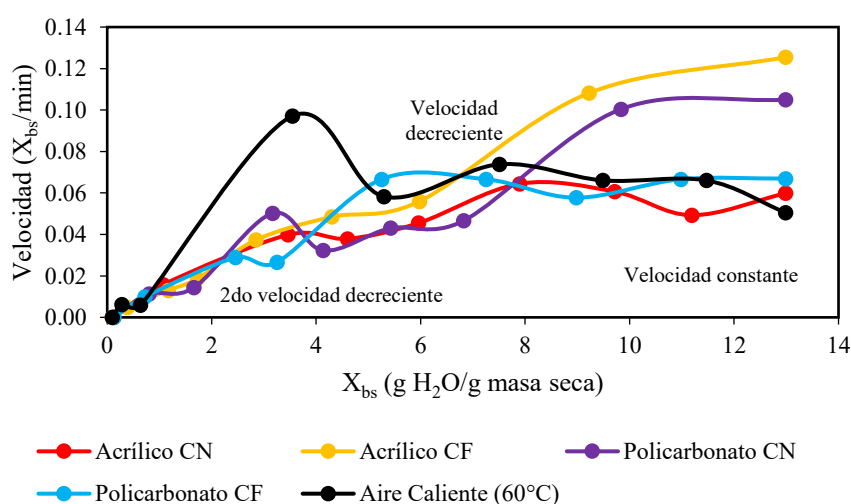


Figura 46. Velocidad de secado de las fresas respecto al tiempo y X_{bs} (agosto del 2024).

Las velocidades de secado en función de la humedad en base seca de los distintos secadores solares, presentan una mayor oscilación debido a la variación de la radiación solar a lo largo del día, afectando en la temperatura interna y en los mecanismos de transferencia de calor y masa. Estudios recientes indican que la irregularidad de la radiación solar condiciona la estabilidad térmica y la eficiencia de los secadores solares como lo menciona Venkateswarlu & Reddy (2024) en su trabajo de investigación sobre las nuevas tendencias en los secadores solares eficientes para el secado de alimentos.

Sin embargo, la velocidad de secado de las fresas deshidratadas mediante el secado por aire caliente no muestra un comportamiento más estable como el de la **Figura 18 c)**. Esta irregularidad puede atribuirse a la influencia de la temperatura del aire ambiente sobre el sistema. Cuando el aire que ingresa no alcanza de forma constante la temperatura de secado de 60°C, se dificulta la homogeneidad de temperatura en el secador provocando gradientes térmicos entre las bandejas, afectando la distribución de calor en cada una de ellas. Venkateswarlu & Reddy (2024) analizó el efecto del secado por aire caliente de 40-70°C en la cinética de secado de frutas, destacando que las variaciones de la temperatura del aire de entrada afecta la uniformidad de la distribución de calor y la calidad del producto final.

La cinética de secado se ve influenciada con la temperatura interna del secador, ya que influye en la tasa de evaporación de agua contenida en el producto, a temperaturas más altas se favorece el proceso de deshidratado. En la **Tabla 15** se reportan las temperaturas internas de los secadores solares para el periodo de agosto del 2024.

Tabla 15. Temperatura interna de los secadores solares (agosto del 2024).

Temperatura dentro de los secadores solares (°C)				
HH:MM Hora estándar	ACN	ACF	PCN	PCF
09:30	33.90	33.10	41.04	33.80
10:30	37.72	33.99	41.39	38.89
11:30	41.56	37.71	44.99	41.10
12:30	44.04	40.95	45.85	43.92
13:30	41.84	47.78	47.03	43.51
14:30	44.56	43.37	47.06	46.04

La temperatura en el interior de los secadores solares fue incrementando progresivamente a lo largo del día, alcanzado sus valores máximos a partir de las 13:30 pm coincidiendo con el momento en que la radiación solar es más intensa. Las temperaturas más elevadas que se registraron fueron para el secador solar de acrílico por convección forzada de 47.78°C y policarbonato por convección natural de 47.06°C, ambos mostrando una variación mínima de temperatura. Los resultados de estas temperaturas son consistentes con Rehman, A. *et al.* (2024), quienes evaluaron diferentes materiales para un secador de tipo invernadero,

destacando al policarbonato como el material más eficiente para la retención de calor. Dicho estudio, el policarbonato permite mantener temperaturas internas constantes y más elevadas, contribuyendo a un secado más eficiente. En el presente trabajo, el secador de policarbonato que operaba por convección natural mostró este comportamiento desde el inicio de las la mediciones, registrando una temperatura de 41.04°C, de forma contraria con los demás secadores, los cuales iniciaron temperaturas cercanas a los 33°C.

En la **Figura 47**, se muestra gráficamente el comportamiento de la evolución de las temperaturas internas registradas en los distintos secadores solares y flujo de aire aplicado a lo largo del proceso de deshidratado de fresa para el periodo de agosto del 2024.

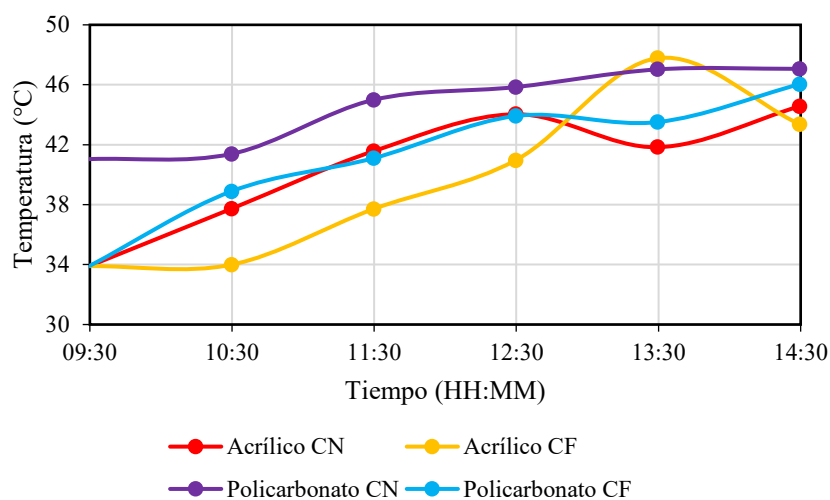


Figura 47. Comportamiento de temperatura interna de los secadores solares (agosto 2024).

Se observa que los secadores solares de acrílico por convección natural y policarbonato por convección forzada presentaron curvas de temperatura similares a lo largo del día. Sin embargo, el secador solar de policarbonato por convección natural fue el que alcanzó los valores de temperatura más elevados, registrando el máximo a las 13:00 pm. En esa misma hora, el secador solar de acrílico por convección forzada natural también alcanzo el mismo valor de temperatura, sin embargo, durante todo el proceso de deshidratado fue el que obtuvo las temperaturas más bajas en comparación con los demás secadores solares. Esto evidencia que según el tipo de material y circulación de aire que se aplique dentro de los secadores, influye de manera significativamente en su comportamiento a lo largo del día.

Febrero del 2025

En el periodo de diciembre a marzo, se tiene la época de invierno, donde las temperaturas del aire o ambiente son más bajas respecto a las de verano. En esta época, la distancia respecto a Sol es la más corta, sin embargo, sus rayos caen perpendicularmente sobre el trópico de Cáncer de manera que, el hemisferio norte se aleja de la incidencia directa de los rayos del Sol (Sección 2.1.2). Debido a esto, se tiene una influencia significativa en el deshidratado solar directo de los alimentos, afectando su evolución térmica en el proceso de secado. Durante la experimentación realizada en febrero del 2025, las condiciones climáticas influyeron en el comportamiento del proceso de secado. En este periodo, el peso inicial de las muestras representativas presentó una mayor variación, con valores entre 3.0-5.0 gramos como se observa en la **Figura 48**.

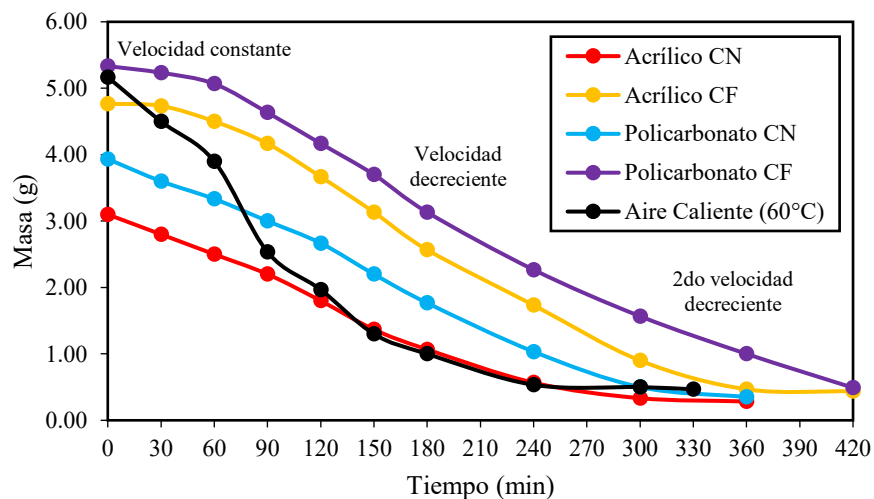


Figura 48. Disminución de masa de las fresas (febrero del 2025).

A diferencia de las fresas deshidratadas durante agosto del 2024, no se identificaron claramente los periodos característicos de la cinética de secado como la etapa de velocidad constante, velocidad decreciente o segunda velocidad decreciente al utilizar los secadores solares. No obstante, se observó una disminución proporcional del peso de las muestras representativas en función del tiempo denotando una pérdida de humedad progresiva en los métodos de secado solar utilizados. Sin embargo, en el secador solar de acrílico por convección natural y en el secado por aire caliente a 60°C se lograron distinguir los periodos. Se observa una etapa de velocidad constante entre los 0 y 120 minutos, seguido de la

velocidad decreciente entre los 120 y 300 minutos, y finalmente una segunda velocidad decreciente entre los 300 y 360 minutos.

El tiempo total de deshidratación varió según el tipo de secador empleado, siendo el proceso más rápido en el secador por aire caliente a 60°C con una duración de 5.5 horas, media hora más que las pruebas realizadas en agosto. Posteriormente, siguieron los secadores solares de policarbonato y acrílico por convección natural, los cuales completaron la deshidratación en un tiempo total de 6 horas. Finalmente, los secadores solares por convección forzada registraron el mayor tiempo de deshidratación de fresa, con una duración de 7 horas.

Así mismo, también se registraron las pérdidas de humedad de las fresas respecto al tiempo como se muestra en la **Figura 49**. El contenido inicial de humedad de las fresas utilizadas en febrero fue menor al de las fresas de agosto, con un valor del 91.77%. Las humedades finales de la fresa deshidratada en orden de menor a mayor fueron las siguientes: policarbonato por convección natural (7.51%), secado por aire caliente (8.88%), acrílico por convección natural (9.95%), acrílico por convección forzada (10.16%) y policarbonato por convección forzada (10.42%).

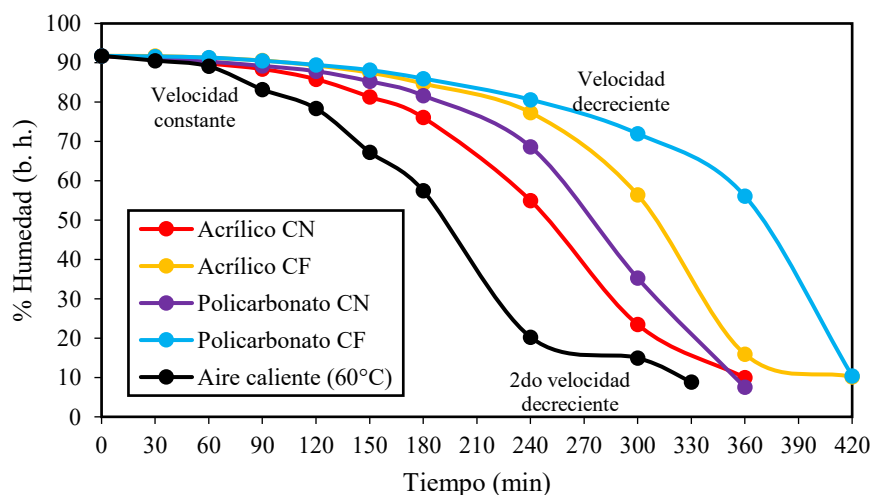


Figura 49. Disminución de humedad de las rodajas de fresa (febrero del 2025).

El secador solar de policarbonato por convección natural logró una menor humedad final en las fresas deshidratadas que el secador por aire caliente en la experimentación de agosto del 2024, con un valor de 8.72%. Cabe destacar que todos los métodos de secador permitieron alcanzar niveles de humedad iguales o inferiores al 10%. No obstante, los secadores solares de acrílico y policarbonato por convección forzada se ubicaron en el límite establecido, garantizando una estabilidad microbiológica de las fresas deshidratadas como lo reporta Vera Zambrano *et al.* (2019).

Los resultados obtenidos en febrero, presentados en la **Figura 50**, muestran que los secadores solares de policarbonato y acrílico por convección forzada registraron las velocidades de secado iniciales más bajas, con valores de 0.0076 y 0.0028 de X_{bs}/min , respectivamente. Este comportamiento se explica porque al tener un ventilador que acelera la circulación de aire interna, impide que la temperatura aumente rápidamente durante la etapa inicial del proceso afectando directamente a la velocidad de secado al inicio.

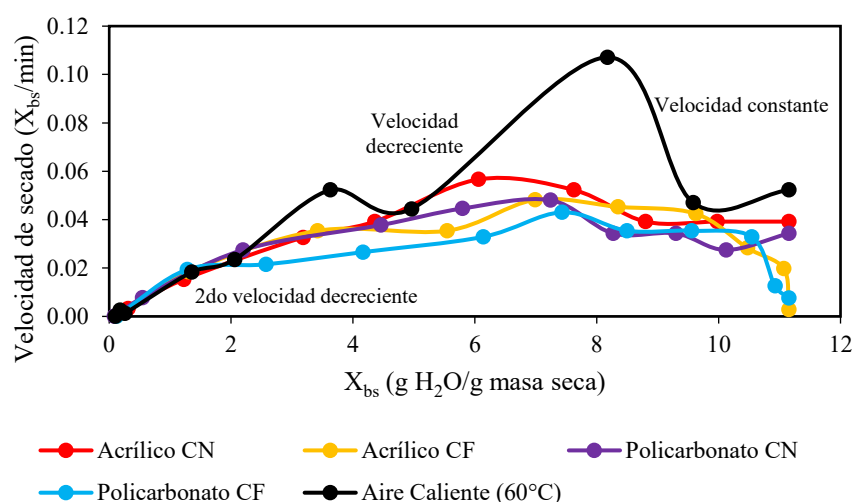


Figura 50. Velocidad de secado de las fresas respecto al tiempo y X_{bs} (febrero del 2025).

En contraste, los secadores solares por convección natural, al no tener un flujo acelerado de aire, permite una mayor acumulación de calor por la radiación solar incidente y, por consiguiente, un aumento notorio en la velocidad de secado durante el primer periodo. Debido a estos factores, la convección natural resulta con temperaturas iniciales más altas y a su vez, en velocidades de secado mayores con valores de 0.0392 y 0.0343 X_{bs}/min para el

secador solar de acrílico y policarbonato respectivamente. De forma similar ocurrió con el secador por aire caliente, donde inicialmente la temperatura ambiente era baja, por lo que la velocidad inicial de secado se vio reducida a $0.0523 X_{bs}/\text{min}$, debido a que el equipo requirió más tiempo para alcanzar y estabilizar su temperatura de operación. Una vez estabilizada la temperatura, la velocidad de secado más alta que alcanzo el secador por aire caliente fue a una humedad en base seca de $8 \text{ g H}_2\text{O/g}$ masa seca con un valor de $0.1071 X_{bs}/\text{min}$, además de ser la más alta de todos los métodos de secado.

En la experimentación realizada de invierno se registraron temperaturas iniciales del proceso de secado más bajas, influyendo en el comportamiento térmico de los métodos de secado empleados y, en consecuencia, en las velocidades de secado. Las temperaturas iniciales registradas en los secadores solares por convección forzada de acrílico y policarbonato como se muestra en la **Tabla 16**, fueron más bajas en comparación con las de los secadores por convección natural. Esto se debe a la menor acumulación de calor causada por la rápida circulación de aire forzado, que impide que la temperatura incremente rápido en la etapa inicial del proceso. El secador que presentó una mayor temperatura a lo largo del proceso fue el de policarbonato por convección natural con un valor de 50.85°C registrado a las 15:00 pm, en la parte final proceso de deshidratado. En contraste, la menor temperatura registrada fue para el de acrílico por convección forzada con un valor de 15.13°C al inicio del proceso.

Tabla 16. Temperatura interna de los secadores solares (febrero del 2025).

Temperatura dentro de los secadores solares ($^\circ\text{C}$)				
HH:MM Hora estándar	ACN	ACF	PCN	PCF
09:00	28.95	15.13	34.00	17.78
10:00	29.46	18.08	30.67	21.36
11:00	36.18	29.89	34.07	32.13
12:00	42.87	36.71	44.53	40.87
13:00	47.55	40.94	49.26	40.98
14:00	45.44	40.94	49.13	41.30
15:00	45.60	38.84	50.85	40.98
16:00		34.96		40.11

Elangovan & Natarajan (2023), estudiaron los coeficientes de transferencia de calor por convección en el secado solar directo de calabaza, demostrando que estos aumentan a medida que se incrementa la temperatura y velocidad de aire interior del sistema. No obstante, en los sistemas de convección forzada, donde la velocidad del aire es mayor, la transferencia de calor se ve limitada por la temperatura de ingreso del aire, condicionando el aumento de temperatura interna. Estos resultados son consistentes con los obtenidos del presente estudio, ya que durante la experimentación de invierno tanto la temperatura como velocidad de secado se vieron influenciadas por una temperatura más baja del ambiente que en verano. En este contexto, los secadores por convección natural al no tener una circulación de aire más rápida, se favoreció la acumulación de calor, temperaturas y velocidades de secado más altas, así como las humedades finales más bajas en tiempo de secado más cortos que los secadores por convección forzada.

La **Figura 51** ilustra la evolución de las temperaturas internas registradas en los secadores solares empleados durante el proceso de deshidratación en la experimentación de febrero del 2025. En general, se puede observar una tendencia similar en el comportamiento de temperatura para todos los equipos, siendo la temperatura más alta durante todo el proceso en los secadores por convección natural, evidenciando una mayor acumulación de calor en comparación con la convección forzada.

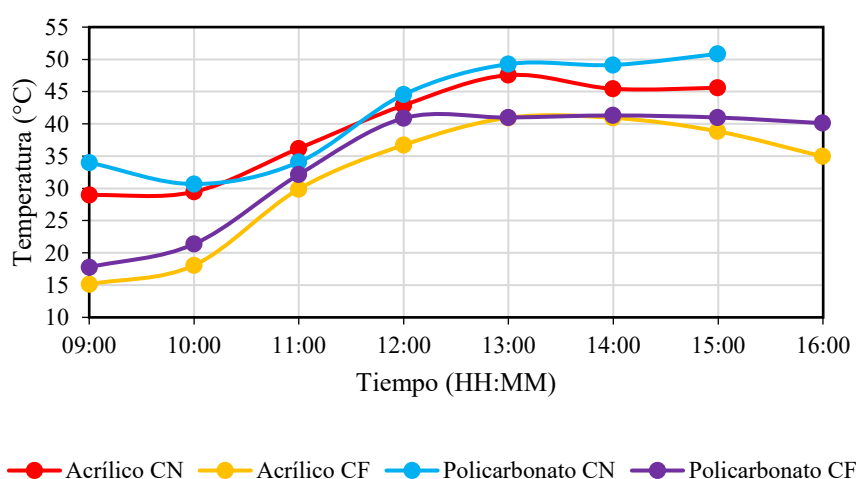


Figura 51. Comportamiento de temperatura interna de los secadores solares (febrero 2025).

Tanto los secadores solares por convección forzada como los de convección natural, alcanzaron valores similares de temperatura interna en determinados del día. Entre las 10 y 13 horas, los secadores de convección forzada presentaron temperaturas muy cercanas entre sí, mientras que entre las 13 y 15 horas ocurrió lo mismo para los de convección forzada. Sin embargo, en la mayor parte del tiempo de operación, las temperaturas más altas se alcanzaron para el secador de policarbonato por convección natural. Por el contrario, el secador solar de acrílico por convección forzada presentó las menores temperaturas, causadas por la rápida circulación de aire en su interior limitando la acumulación térmica.

En el caso del secador por aire caliente de la experimentación de febrero, se registró la evolución de la temperatura en cada una de sus bandejas (3 en total) y se presentan en la **Figura 52**. La bandeja del nivel 2 (intermedia), registró mayores temperaturas, sobrepasando ligeramente los 60°C, que es el valor de la temperatura de operación establecida del secador. Por otro lado, el nivel 1 (inferior), que es la zona donde ingresa el aire caliente, mostró temperaturas más bajas durante el proceso, debido a que el aire que proviene del entorno no puede alcanzar la temperatura deseada de forma inmediata, afectando el calentamiento del nivel inferior. Finalmente, la temperatura del nivel 3 (superior), registró valores de temperatura intermedio entre el nivel 1 y 2, acercándose progresivamente a los 60°C. A partir de los 240 minutos las temperaturas en los 3 niveles se estabilizaron, en los niveles 1 y 3 se alcanzó la temperatura de operación establecida, y el nivel 2 superó ligeramente los 60°C.

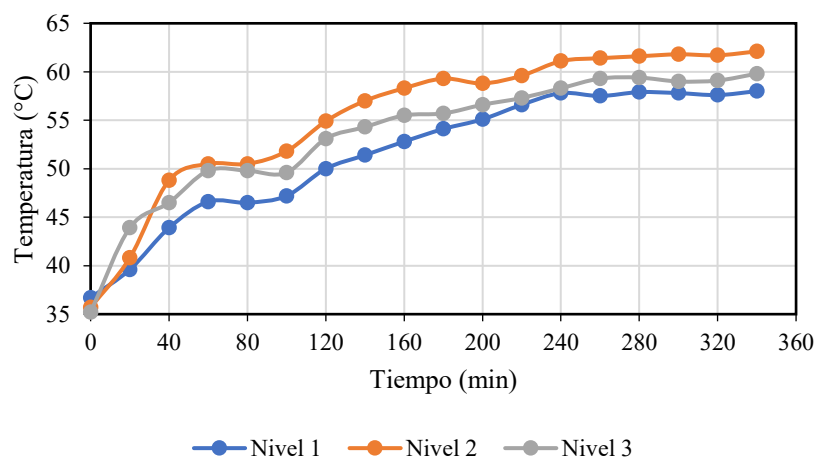


Figura 52. Temperatura interna en las bandejas del secador por aire caliente.

Estas variaciones de temperatura pueden ocasionar una uniformidad en el secado de las rodajas de fresa en cada uno de los niveles, por lo que su cinética y velocidad de secado pueden variar en los periodos iniciales del proceso de deshidratado hasta llegar a su estabilización. Rakyat *et al.* (2021) modelaron la distribución de temperatura y de aire en un secador de bandejas convencional, demostrando que el acomodo del alimento influye en la acumulación térmica de las bandejas, generando zonas muertas de circulación, afectando principalmente a las bandejas superiores. Los resultados obtenidos en el presente estudio, son parcialmente congruentes con dichos hallazgos, ya que se reportaron diferentes perfiles de temperatura en los 3 niveles, mostrando una temperatura menor en el nivel 3 (superior) respecto a la del nivel 2 (intermedio).

8.4 Ajuste de la curva de secado a un modelo analítico

El ajuste de las curvas de cinética a modelos matemáticos son una herramienta fundamental para describir de forma precisa el comportamiento de pérdida de humedad del producto durante el proceso de deshidratado. Ayuda a validar el comportamiento experimental y permite la optimización de las condiciones de operación proceso como la velocidad de secado más óptima o elegir la mejor temperatura de secado.

Agosto del 2024

En la **Tabla 17** se reportan los tres modelos analíticos con el mejor ajuste (R^2) y sus parámetros de ajuste (a , b , k y n) para cada uno de los tipos de secadores utilizados en el deshidratado de fresa durante la experimentación de agosto. El modelo que mostró ser el más adecuado fue el de Weibull con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99 para todos los métodos de secado, seguido del modelo de Page, Page modificado, Wang y Singh, y Logarítmico indicando un buen ajuste de los datos experimentales.

Tabla 17. Parámetros de ajuste de modelos analíticos y coeficiente de determinación (agosto del 2024).

Modelos	Parámetros de ajuste y coeficiente	Método de secado				
		Aire Caliente	Acrílico CN	Acrílico CF	Polycarbonato CN	Polycarbonato CF
Weibull	a	-0.0371	-0.1744	-0.0212	-0.1019	-0.0593
	b	-1.0122	-1.1670	-1.0224	-1.1038	-1.0492
	k	0.2490	0.2480	0.7244	0.5254	0.3305
	n	1.8334	1.2841	1.0501	0.9489	1.3674
	R ²	0.9914	0.9986	0.9993	0.9970	0.9979
Page	k	0.2774	-	-	-	0.4894
	n	1.8393	-	-	-	1.4533
	R ²	0.9889	-	-	-	0.9961
Page Modificado	k	0.4980	0.4292	0.4636	0.6156	0.3539
	n	1.8393	1.4905	1.7264	1.0812	1.4533
	R ²	0.9889	0.9936	0.9990	0.9942	0.9961
Wang y Singh	a	-	-0.3091	-	-	-
	b	-	0.0210	-	-	-
	R ²	-	0.9968	-	-	-
Logarítmico	a	-	-	-	1.0701	-
	c	-	-	-0.0344	-0.0738	-
	k	-	-	0.7224	0.5317	-
	R ²	-	-	0.9991	0.9968	-

El valor más alto de la constante de secado (k) se obtuvo en el secador solar de acrílico por convección forzada con un valor de $k = 0.7244$ y un parámetro de forma de $n = 1.0501$, valor muy cercano a 1. Este resultado indica un comportamiento de una cinética exponencial de primer orden, descrita por el modelo de Newton, donde la velocidad de secado va disminuyendo proporcionalmente a medida que disminuye el agua contenida en el alimento.

Caso contrario, la menor velocidad de secado se registró para el secador solar de acrílico por convección natural, con un valor de $k = 0.2480$ y un parámetro de forma de $n = 1.2841$. Un valor de $n > 1$, sugiere que predomina un periodo de velocidad de secado acelerada, lo cual es característico de alimentos con estructuras porosas y humedades iniciales elevadas.

Febrero del 2025

Al igual que en la experimentación realizada en agosto, en la **Tabla 18** se presentan los modelos que ofrecieron un mejor ajuste de datos a las cinéticas de secado de fresa. Los 3 modelos más representativos fueron Weibull, Page y Page modificado, destacando el modelo de Weibull con el mejor ajuste, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99.

Tabla 18. Parámetros de ajuste de modelos analíticos y coeficiente de determinación (febrero del 2025).

Modelos	Parámetros de ajuste y coeficiente	Método de secado				
		Aire Caliente	Acrílico CN	Acrílico CF	Policarbonato CN	Policarbonato CF
Weibull	a	-0.0011	-0.0370	-0.0347	-0.1019	-0.1063
	b	-0.9948	-1.0139	-1.0387	-1.0726	-1.1149
	k	0.3715	0.1859	0.0655	0.1179	0.0753
	n	1.6549	1.6763	2.1037	1.7150	1.7461
	R^2	0.9962	0.9979	0.9990	0.9971	0.9992
Page	k	0.3788	0.3911	0.0609	0.1351	0.2541
	n	1.6403	1.6888	2.2191	1.8067	1.9598
	R^2	0.9961	0.9960	0.9960	0.9919	0.9977
Page Modificado	k	0.5533	0.2049	0.2834	0.3302	0.0682
	n	1.6403	1.6888	2.2191	1.8067	1.9598
	R^2	0.9961	0.9960	0.9960	0.9919	0.9977

A diferencia con el periodo de anterior (agosto del 2024), el secado por aire caliente si mostró una mayor velocidad de secado de $k = 0.3715$ y un parámetro de forma de $n = 1.6549$, lo que indica una cinética exponencial simple. Este resultado es coherente al ser una temperatura constante en el secado por aire caliente, donde se espera una velocidad de secado más alta. Por el contrario, las velocidades de secado más bajas (k) se obtuvieron en los secadores solares de acrílico y policarbonato por convección forzada de 0.0655 y 0.0753, con valores de parámetros de forma (n) de 2.1037 y 1.7461. Las bajas velocidades de secado observadas pueden explicarse por las temperaturas iniciales del proceso, las cuales fueron menores que las de los secadores solares por convección natural. Estas condiciones afectaron los periodos iniciales del proceso, dificultando la acumulación térmica y una rápida tasa de secado inicial,

en la **Tabla 16** se observan las temperaturas registradas y en la **Figura 46** la evolución térmica de los secadores.

Estos resultados son consistentes con Karaaslan *et al.* (2022), quienes estudiaron los efectos del secado del túnel solar (tipo directo) y otros métodos de secado en la cinética de secado de fresa, donde el modelo que presentó un mejor ajuste fue el de Weibull. Por su parte, El-Beltagy *et al.* (2007) estudiaron el secado solar indirecto de fresa pretratada con diferentes soluciones y realizaron el ajuste de las cinéticas de secado, encontraron que el modelo de Newton (cinética exponencial de primer orden) describió de manera adecuada el proceso.

En el presente estudio, los resultados obtenidos coinciden con lo reportado en la literatura consultada, ya que tanto el modelo de Weibull y el modelo de Newton presentaron el mejor ajuste a los datos experimentales. Ambos modelos son los que mejor describen el proceso de pérdida de humedad de fresa, independientemente del método empleado. Estos modelos presentaron un buen ajuste tanto en los secadores solares directos y el secado por aire caliente, por lo que son aplicables para simular la pérdida de humedad en el fruto de la fresa. Esto evidencia la aplicabilidad para la predicción y la simulación del comportamiento de la disminución de humedad durante el proceso de deshidratación de la fresa, así como representar de manera confiable su cinética de secado.

En el Anexo B se muestra de forma gráfica el ajuste de los datos experimentales al modelo analítico de Weibull con la ecuación correspondiente para cada uno de los métodos de secado.

8.5 Evaluación de la radiación UV dentro de los secadores solares

Los compuestos bioactivos y las propiedades fisicoquímicas de los alimentos deshidratados constituyen indicadores de la calidad final del producto. En el caso de la fresa, la exposición directa a la radiación UV durante su deshidratado puede comprometer significativamente su composición, acelerando la oxidación de sus compuestos bioactivos y oscurecer su color característico. Por ello, resulta fundamental utilizar cubiertas que disminuyan parte de esta radiación incidente dentro de los secadores y cuantificar la cantidad de radiación que logra pasar en dichos materiales con la finalidad de seleccionar el mejor material que preserve la calidad del producto.

Agosto del 2024

En la **Tabla 19** se presentan los datos de la radiación UV medida tanto en el interior de los secadores solares y como la del ambiente exterior. Los resultados muestran que los secadores contruidos de acrílico permitieron el paso de prácticamente toda la radiación UV, especialmente con valores mayores para la convección natural, registrando valores comparables a los de radiación UV exterior entre las 10:30 y 13:30 horas.

Tabla 19. Radiación UV dentro de los secadores solares (agosto del 2024).

Radiación UV (W/m ²)					
(HH:MM)	Exterior	MCN	MCF	PCN	PCF
09:30	0.0807	0.0646	0.0646	0.0269	0.0161
10:30	0.0846	0.0810	0.0677	0.0434	0.0265
11:30	0.0854	0.0854	0.0721	0.0530	0.0323
12:30	0.0839	0.0839	0.0727	0.0634	0.0261
13:30	0.0835	0.0835	0.0597	0.0501	0.0333
14:30	0.0832	0.0667	0.0832	0.0426	0.0315
Promedio =	0.0836	0.0775	0.0725	0.0466	0.0265

De forma contraria, la menor transmisión de radiación UV se mostró para los secadores contruidos de policarbonato. El sistema por convección forzada alcanzó su valor más alto a la 13:30 horas de 0.0501 W/m², seguido de la convección natural con un pico máximo de 0.0634 W/m² a las 12:30 horas. Esta menor transmitancia contribuye a la protección de los compuestos fotosensibles presentes en la fresa como los fenoles totales, antocianinas y ácido ascórbico, que suelen oxidarse más rápido por efecto de la radiación UV.

En la **Figura 53** se observa que los secadores de acrílico tanto por convección forzada y natural permiten una mayor incidencia de la radiación UV sobre las fresas en proceso de deshidratación, lo que favorece la degradación de sus compuestos bioactivos y genera alteración en el color final del producto. En contraste, el secador solar de policarbonato transparente presentó una menor transmitancia de la radiación UV a lo largo de todo el proceso, protegiendo los compuestos fotosensibles presentes en la fresa.

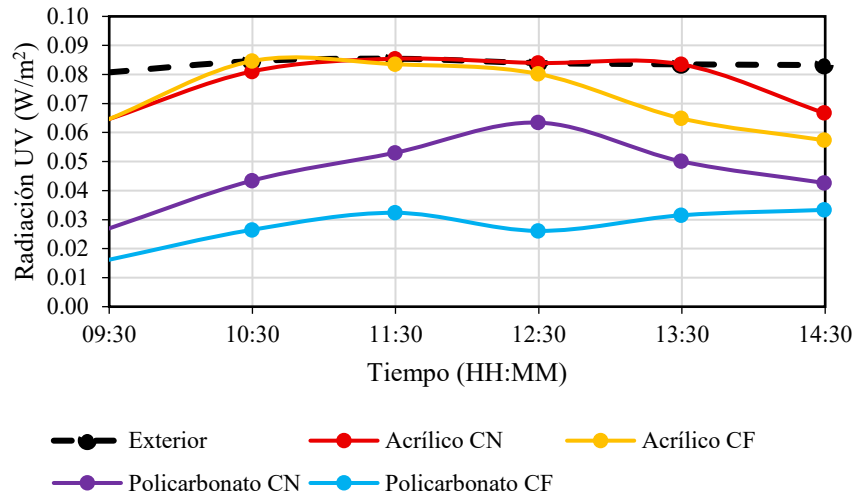


Figura 53. Comportamiento de la radiación UV en el interior de los secadores solares durante el periodo de verano (agosto 2024)

El secador de acrílico por convección forzada antes de las 10:30 horas y después de las 12:30 horas muestra una disminución de la radiación UV incidente en su interior. Debido a esto, se identificó que la convección forzada en los secadores solares puede llegar a disminuir la radiación UV en su interior, debido a que el mayor flujo de aire que circula dentro de ellos puede dispersar parte de la radiación incidente, disminuyendo su impacto en el producto.

Febrero del 2025

La intensidad de radiación solar recibida en el periodo de invierno es menor en comparación con la de verano y, por lo tanto, la radiación UV también se ve afectada en estos periodos como se menciona en la sección 2.1.2. Esta variación puede apreciarse en la **Tabla 20**, donde la radiación UV exterior tuvo una disminución de 0.03 W/m^2 respecto a las mediciones de verano a las 9:00 horas y de hasta 0.1 W/m^2 a partir de las 14:00 horas, momento donde comenzaba a alcanzar su punto máximo. En estas condiciones, los secadores de acrílico volvieron presentaron una mayor transmisión de la radiación UV, alcanzando sus valores máximos alrededor de la 13:00 horas, con 0.0641 W/m^2 para el de convección natural y 0.0612 W/m^2 para el de convección forzada. En contraste, la mayor transmisión de radiación UV en los secadores de policarbonato se presenta a las 12:00 del mediodía, con valores de 0.0471 W/m^2 para el de convección natural y 0.0431 W/m^2 para el de convección forzada.

Tabla 20. Radiación UV interna de los secadores solares (febrero del 2025).

Radiación UV (W/m ²)					
(HH:MM)	Exterior	ACN	ACF	PCN	PCF
09:00	0.0504	0.0235	0.0101	0.0101	0.0034
10:00	0.0495	0.0377	0.0155	0.0144	0.0100
11:00	0.0514	0.0514	0.0377	0.0264	0.0263
12:00	0.0605	0.0605	0.0565	0.0471	0.0431
13:00	0.0673	0.0641	0.0612	0.0448	0.0417
14:00	0.0710	0.0584	0.0599	0.0378	0.0394
15:00	0.0751	0.0501	0.0467	0.0284	0.0250
16:00	0.0782		0.0400		0.0191
Promedio =	0.0584	0.0493	0.0402	0.0301	0.0249

La **Figura 54** muestra forma gráfica la evolución de la radiación UV en el interior de los secadores solares durante el proceso de deshidratación de fresa. Se observa que los secadores solares de policarbonato muestran un comportamiento similar de la transmitancia de radiación UV a lo largo del proceso, siendo menor solo al inicio para el sistema de convección forzada. Sin embargo, de manera general, estos son menores que los registrados para los secadores contruidos de acrílico, remarcando la capacidad del policarbonato para bloquear la radiación UV.

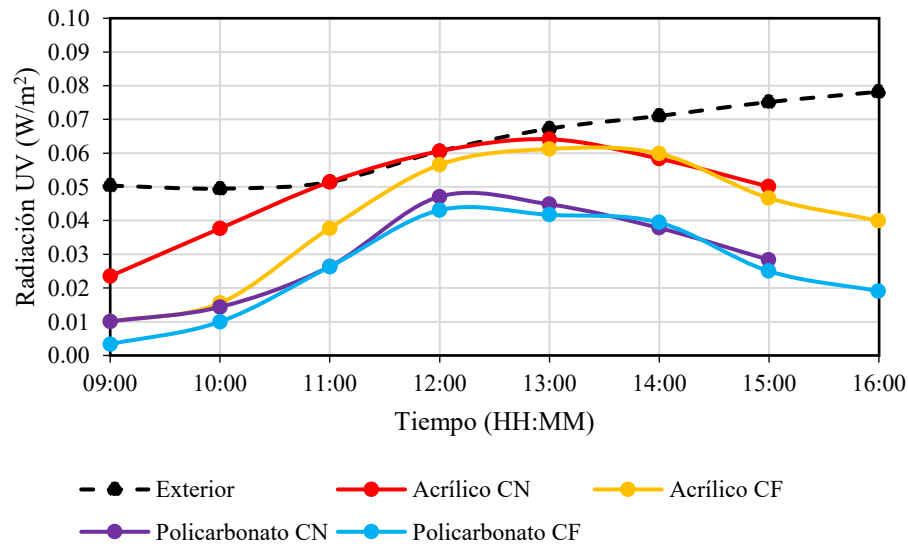


Figura 54. Comportamiento de la radiación UV en el interior de los secadores solares durante el periodo de verano (febrero 2025)

A diferencia de lo observado en la experimentación de agosto, durante el proceso de secado de febrero la radiación UV fue considerablemente mucho menor. Sin embargo, el tiempo total de secado se prolongó 2 horas más para los sistemas de convección forzada y 1 hora para los de convección natural. Este incremento en la duración del proceso de secado implica una mayor exposición de las fresas a la temperatura y al oxígeno presente en el aire, favoreciendo las reacciones de oxidación de los compuestos bioactivos (Sección 2.2.2). Lo cual se traduce en la disminución del contenido fenólico, antocianinas totales, ácido ascórbico y una alteración en el color final del producto deshidratado.

Los datos obtenidos de las diferencias en las transmitancias de la radiación UV en los distintos materiales utilizados para la fabricación de los secadores solares, en los periodos de verano e invierno, son consistentes con lo reportado en la literatura. Serrano y Moreno (2020), quienes evaluaron la transmitancia de radiación UV en distintos materiales transparentes en los periodos de verano e invierno, obtuvieron que el acrílico presenta mayor paso de la radiación respecto al policarbonato. De forma complementaria, Rodríguez-Ramírez *et al.* (2021) estudiaron el efecto de diferentes cubiertas de materiales transparentes (polietileno y policarbonato) en el deshidratado de pulpa de fresa, donde el policarbonato fue la cubierta que bloqueó casi por completo la radiación UV.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran que el método de secado tiene una influencia significativa en los compuestos bioactivos y en la cinética de secado de deshidratado de fresa, según la cantidad de radiación solar recibida en los periodos de experimentación realizados.

En condiciones óptimas de radiación solar y elevadas temperaturas ambientales como en la experimentación de agosto del 2024, el secador solar de policarbonato por convección forzada demostró ser una alternativa eficiente y viable para el deshidratado de fresa. No solo permitió la mayor conservación de los compuestos bioactivos como las antocianinas totales y el ácido ascórbico, sino también aumentó de manera significativa el contenido fenólico total en la fresa y presentó la menor transmitancia de radiación UV. Además, aseguró la estabilidad microbiológica del producto al obtener una humedad y actividad del agua por debajo del 10% y 0.6 respectivamente, así como el menor cambio de coloración respecto a la fresa fresca. Los estudios realizados en febrero del 2025 demostraron una menor eficiencia de los secadores solares debido al incremento en los tiempos de secado, pérdida significativa de antocianinas y ácido ascórbico en la fresa deshidratada. Si bien todos los métodos de secado favorecieron el incremento del contenido fenólico total, el secador por aire caliente presentó el mejor desempeño al conservar los compuestos bioactivos en la fresa deshidratada.

El análisis de las cinéticas de secado de fresa evidenció que los modelos analíticos de Weibull, Page y Page modificado presentan el mejor ajuste para describir el proceso. Se observó que la convección forzada incrementa los valores de k , asociados a una mayor velocidad de secado. Estos resultados resaltan la importancia de optimizar el diseño de los secadores solares de tipo directo por convección forzada, especialmente en el invierno (febrero del 2025), donde la menor radiación solar limita la acumulación térmica interna. Cabe destacar que, en este periodo, los secadores solares por convección natural alcanzaron las temperaturas internas más elevadas durante el proceso.

Con base a lo anterior, la hipótesis se acepta al observar una mayor conservación al 10% de las antocianinas totales y el menor ΔE en la fresa deshidrata en el secador solar de policarbonato por convección forzada en agosto. Como trabajo a futuro, se propone la optimización del secado solar durante invierno, con la finalidad de reducir el tiempo de secado y mejorar la conservación de los compuestos bioactivos.

PERSPECTIVAS

En la experimentación de febrero del 2025 no se alcanzaron los mismos tiempos de secado ni se preservaron los compuestos bioactivos y propiedades fisicoquímicas en comparación con los resultados obtenidos en agosto del 2024. No obstante, demostró que el uso del policarbonato en la construcción de secadores solares del tipo directo, bajo condiciones ambientales favorables (como en verano), permite un proceso de deshidratado más rápido y con una mejor conservación de los compuestos bioactivos y propiedades fisicoquímicas, asegurando un producto final de calidad. Esto resalta la importancia de optimizar los secadores solares por convección forzada incorporando bases de plástico oscuro que absorban la radiación solar, acumulen esta energía en forma de calor e incrementen la temperatura interna del secador para agilizar el proceso.

Además, analizar mediante una Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC), permitiendo una caracterización más profunda del contenido fenólico total, al separar, identificar y cuantificar individualmente los distintos polifenoles en la fresa deshidratada. Este análisis precisaría los compuestos con potencial antioxidante y se entendería como el proceso de deshidratado afecta a los polifenoles presentes, promoviendo la formación de nuevos compuestos o la degradación de otros.

REFERENCIAS

- Aamer, R. A., Amin, W. A., & Attia, R. S. (2021). Enhancement of color stability in strawberry nectar during storage. *Annals of Agricultural Sciences*, 66(2), 121–130. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2021.08.003>
- Abdel-Aal, E. S. M., & Hucl, P. (1999). A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. *Cereal Chemistry*, 76(3), 350–354. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.3.350>
- Agbo, E. P., Edet, C. O., Magu, T. O., Njok, A. O., Ekpo, C. M., & Louis, H. (2021). Solar energy: A panacea for the electricity generation crisis in Nigeria. *Heliyon*, 7(5), e07016. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07016>
- Álvarez, R. R., Contreras, I. I. R., Molina, O. M., & Reza, I. R. (2023). Evaluación del impacto nutricional, ambiental y económico de los desperdicios orgánicos del tianguis de Ozumba, Estado de México. *UVserva*, 16, 246–259. <https://doi.org/10.25009/uvs.vi16.2980>
- Arias, M. O. P. (2023). *Efecto del compost de orujo de uva variedad borgoña sobre las características físicas químicas y funcionales de la fresa (Fragaria x ananassa) en postcosecha* [Universidad Nacional de Moquegua]. <https://repositorio.unam.edu.pe/items/f3fda504-0f65-4770-ad91-ca30b3bf9871>
- Azimova, S. S., & Glushenkova, A. I. (2021). Diseño autónomo del sistema solar térmico para la deshidratación indirecta de Aguaymanto. *Lipids, Lipophilic Components and Essential Oils from Plant Sources*, 33(1), 115–124. <https://doi.org/10.17163.lgr.n33.2021.10>
- Bañuelos Mireles, J. A., Arellano Carrera, E. U., García Saldívar, V. M., & García González, J. M. (2019). Deshidratado de durazno (*Prunus persica*). *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos Deshidratado*, 4, 411–415.
- Barrios, E. E. B., & Díaz, S. A. (2023). Propuesta de diseño de estufas solares sustentables para alimentos endémicos de Colima, México. *Innovación y Desarrollo Tecnológico Revista Digital*, 15, 13. <https://www.researchgate.net/publication/375695224>
- Barrón, M. V. (2018). *Servicio Solarimétrico Mexicano. Datos de Radiación Solar*. <https://rayenari.geofisica.unam.mx/mexico/datsolar.html>
- Carrillo-Carrillo, M., Castorena-Alemán, J. D., García-Jiménez, F. A., Conejo-Flores, R., Concha, J. C., & García-González, J. M. (2020). Deshidratación de piña (*Ananas comosus*) mediante radiación solar directo. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos Deshidratación*, 5, 145–148.
- Carrillo-Carrillo, Manuela, Castorena-Alemán, J. D., García-Jiménez, F. de los Á., & García-González, J. M. (2020). Deshidratación de plátano (*Musa paradisiaca*) por medio de radiación solar en un secador directo. *Revista de Sistemas Experimentales*, 6(19), 19–23. <https://doi.org/10.35429/joes.2019.19.6.19.23>

- Castañeda-Villanueva, O., A.Hernandez-Chavez, Rucoba-Garcia, A., Hernández-Ruiz, J., Nieto., J. E. R., & Mireles-Arriaga, A. I. (2019). Aceptabilidad de fresa deshidratada y tratada con edulcorantes como opción de “snack” saludable. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4, 600–605.
- César, L. E., Isaac, P. F., & Arturo, N. (2015). Drying of Strawberry in a Direct and Indirect Solar Dryer (Effects of Drying Methods on Total Phenolic Content). *International Journal of Advances in Agricultural and Environmental Engineering*, 2(2), 61–63. <https://doi.org/10.15242/IJAAEE.ER1215017>
- Cuse Quispe, J., Lima Pimentel, V. H., & Cutipa Chávez, L. (2021). Cinética de la degradación y estabilidad del ácido ascórbico en la pulpa de copoazu (*Theobroma grandiflorum*). *Revista Agrotecnológica Amazónica*, 1(1), 4–19. <https://doi.org/10.51252/raa.v1i1.113>
- Del Rio Félix, U. F., Carrera-Arellano, E. U., García Saldívar, V. M., & García-González, J. M. (2019). Deshidratado de ajo (*Allium sativum*) utilizando tecnología solar por convección natural y forzada. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 4, 393–398.
- Del Rio Félix, U. F., Carrera Arellano, E. U., García Saldivar, V. M., & García González, J. M. (2019). Deshidratado de ajo (*Allium sativum*) utilizando tecnología solar por convección natural y convección forzada. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos Deshidratación*, 4, 393–398.
- Díaz, A. S. L., Iglesias, J. B., Islas, D. T., Ramírez, J. R., & Laguna, L. L. M. (2023). Efecto del proceso de liofilización en las propiedades estructurales de fresas (*Fragaria ananassa*). *Contribución al Conocimiento Científico y Tecnológico en Oaxaca*, 7. <https://www.researchgate.net/publication/374385407%0AEfecto>
- Domínguez-Niño, A., Guillén-Velázquez, P., Santos-González, I., García-Valladares, O., & Vázquez-Morales, J. M. (2025). Total Phenolic, Flavonoid Content, and Antioxidant Activity of Dried Marigold (*Tagetes erecta* L.) Petals Produced in a Mixed-Mode Solar Dryer. *Plant Foods for Human Nutrition*, 80(3). <https://doi.org/10.1007/s11130-025-01366-z>
- Domínguez-Niño, A., Lucho-Gómez, A. M., Chávez-Santos, R. M., Martínez, R., Guillén-Velázquez, P., Castillo-Téllez, B., & García-Valladares, O. (2024). Thermal evaluation of solar dryers and the effect on the antioxidant and some physicochemical properties of *Agastache mexicana* and *Rosmarinus officinalis*. *Journal of Food Science*, September, 7846–7860. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.17447>
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind Emeritus Professor of Mechanical Engineering* (Vol. 5). John Wiley & Sons, Inc.
- Dzhanfezova, T., Barba-Espín, G., Müller, R., Joernsgaard, B., Hegelund, J. N., Madsen, B., Larsen, D. H., Martínez Vega, M., & Toldam-Andersen, T. B. (2020). Anthocyanin profile, antioxidant activity and total phenolic content of a strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch) genetic resource collection. *Food Bioscience*, 36(100620), 1–7.

<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100620>

- El-Beltagy, A., Gamea, G. R., & Essa, A. H. A. (2007). Solar drying characteristics of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 456–464. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.10.015>
- Elangovan, E., & Natarajan, S. K. (2023). Convective and evaporative heat transfer coefficients during drying of ivy gourd under natural and forced convection solar dryer. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(4), 10469–10483. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22865-5>
- ElGamal, R., Song, C., Rayan, A. M., Liu, C., Al-Rejaie, S., & ElMasry, G. (2023). Thermal Degradation of Bioactive Compounds during Drying Process of Horticultural and Agronomic Products: A Comprehensive Overview. *Agronomy*, 13(6), 1580. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061580>
- Erşan, S., Müller, M., Reuter, L., Carle, R., & Müller-Maatsch, J. (2022). Co-pigmentation of strawberry anthocyanins with phenolic compounds from rooibos. *Food Chemistry: Molecular Sciences*, 4(March), 100097. <https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100097>
- Fernandes, L., & Tavares, P. B. (2024). A Review on Solar Drying Devices: Heat Transfer, Air Movement and Type of Chambers. *Solar*, 4(1), 15–42. <https://doi.org/10.3390/solar4010002>
- Frías Hernández, J. D., González Cabrera, A. E., Villegas Martínez, R. C., & García González, J. M. (2022). Evaluation of the UV index in the campus UAZ siglo XXI for the year 2019. *ECORFAN Journal Republic of Nicaragua*, 8(14), 11–14. <https://doi.org/10.35429/ejrn.2022.14.8.11.14>
- García-Valladares, O., Ortiz, N. M., Pilatowsky, I., & Menchaca, A. C. (2020). Solar thermal drying plant for agricultural products. Part 1: Direct air heating system. *Renewable Energy*, 148, 1302–1320. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.069>
- Gutiérrez, J. Z. (2023). *Efecto de atmósferas controladas en el color y vida de anaquel de frambuesa roja (Rubus Idaeus)* [Universidad Autónoma de Querétaro]. <https://ring.uaq.mx/handle/123456789/7877>
- Guzman-Puyol, S., Hierrezuelo, J., Benítez, J. J., Tedeschi, G., Porras-Vázquez, J. M., Heredia, A., Athanassiou, A., Romero, D., & Heredia-Guerrero, J. A. (2022). Transparent, UV-blocking, and high barrier cellulose-based bioplastics with naringin as active food packaging materials. *International Journal of Biological Macromolecules*, 209, 1985–1994. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.177>
- He, J., & Monica Giusti, M. (2010). Anthocyanins: Natural colorants with health-promoting properties. *Annual Review of Food Science and Technology*, 1(1), 163–187. <https://doi.org/10.1146/annurev.food.080708.100754>
- Janjai, S., & Bala, B. K. (2017). Solar Drying Technology Concept, Design, Testing, Modeling, Economics, and Environment. *Food Engineering Reviews*, 4(1), 16–54. https://www.researchgate.net/publication/312218109_Solar_Drying_Technology_Concept_Design_Testing_Modeling_Economics_and_Environment

- Karaaslan, S., Kiliç, H. Ç., & Ekinçi, K. (2022). Effects of solar tunnel drying, shade drying and microwave drying methods on the drying kinetics of strawberry (*Fragaria ananassa*). *Semina: Ciencias Agrarias*, 43(5), 1941–1956. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n5p1941>
- Kaya, E. (2021). *Astronomy Kulübü*. El origen de los elemntos de nuestro universo. <https://astronomi.itu.edu.tr/astrofizik/evrenimizdeki-elementlerin-kokeni/>
- Kirschbaum, D. (2021). Características botánicas, fisiología y tipos de variedades de fresa. En *Cultivo, poscosecha, procesado y comercio de berries* (pp. 103–116). Namesny, A.; Conesa, C.; Olmos, L. M.; Papasseit, P. <https://www.researchgate.net/publication/356251371%0ACaracterísticas>
- Komonsing, N., Reyer, S., Khuwjitjaru, P., Mahayothee, B., & Müller, J. (2022). Drying Behavior and Curcuminoids Changes in Turmeric Slices during Drying under Simulated Solar Radiation as Influenced by Different Transparent Cover Materials. *Foods*, 11(5), 696. <https://doi.org/10.3390/foods11050696>
- Kwaśniewska-Karolak, I., & Mostowski, R. (2021). Effect of different drying processes on an antioxidant potential of three species of the Lamiaceae family. *Herba Polonica*, 67(1), 8–17. <https://doi.org/10.2478/hepo-2021-0004>
- Li, T., Yamane, H., & Tao, R. (2021). Preharvest long-term exposure to UV-B radiation promotes fruit ripening and modifies stage-specific anthocyanin metabolism in highbush blueberry. *Horticulture Research*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41438-021-00503-4>
- Lingayat, A., Balijepalli, R., & Chandramohan, V. P. (2021). Aplicaciones de tecnologías de secado basadas en energía solar en diversas industrias: una revisión. *Solar Energy, May*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.058>
- Liu, H., Wei, L., Ni, Y., Chang, L., Dong, J., Zhong, C., Sun, R., Li, S., Xiong, R., Wang, G., Sun, J., Zhang, Y., & Gao, Y. (2022). Genome-Wide Analysis of Ascorbic Acid Metabolism Related Genes in *Fragaria × ananassa* and Its Expression Pattern Analysis in Strawberry Fruits. *Frontiers in Plant Science*, 13(July), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.954505>
- López-Ortiz, A., Navarrete Salgado, M., Nair, P. K., Balbuena Ortega, A., Méndez-Lagunas, L. L., Hernández-Díaz, W. N., & Guerrero, L. (2024). Improved preservation of the color and bioactive compounds in strawberry pulp dried under UV-Blue blocked solar radiation. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 9(100112). <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2024.100112>
- López-Ortiz, A., Pacheco Pineda, I. Y., Méndez-Lagunas, L. L., Balbuena Ortega, A., Guerrero Martínez, L., Pérez-Orozco, J. P., del Río, J. A., & Nair, P. K. (2021). Optical and thermal properties of edible coatings for application in solar drying. *Scientific Reports*, 11(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88901-5>
- Macedo, L. L., Corrêa, J. L. G., Petri Júnior, I., Araújo, C. da S., & Vimercati, W. C. (2022). Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (Palatinose) impregnated strawberry. *Lwt*, 155.

<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112918>

- Mandi, L., Hilali, S., Chemat, F., & Idlimam, A. (2019). La energía solar como energía sostenible para el procesamiento, la conservación y la extracción. En *Green Food Processing Techniques*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815353-6.00018-5>
- María, F., & Santos, I. D. E. L. O. S. (2020). Deshidratación solar : la forma de conservar tus alimentos sin contaminar. *Universitarios Potosinos*, 10–15.
- Martínez, M. E. P., Achondo, T. de J. R., & Juan Luis Jacobo Cuéllar. (2023). La fresa (Fragaria X ananassa): su valor económico y cultural en México e importancia en la producción de antioxidantes. En I. E. J. Eduardo (Ed.), *Nuevas territorialidades. Gestión de los territorios con inclusión, innovación social y sostenibilidad* (Vol. 2, pp. 181–204). Universidad Nacional Autónoma de México. <https://ru.iiec.unam.mx/6130/>
- Martínez, P. I. S. (2021). *Análisis fitoquímico y evaluación de la actividad antioxidante y antifúngica de Asphodellus fistulosus L.* [Universidad Autónoma de Zacatecas]. <https://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/handle/20.500.11845/2923>
- Mashitoa, F. M., Shoko, T., Shai, J. L., Slabbert, R. M., Sultanbawa, Y., & Sivakumar, D. (2021). Influence of Different Types of Drying Methods on Color Properties, Phenolic Metabolites and Bioactivities of Pumpkin Leaves of var. Butternut squash (Cucurbita moschata Duchesne ex Poir). *Frontiers in Nutrition*, 8(June), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.694649>
- Méndez-Lagunas, L., Rodríguez-Ramírez, J., Cruz-Gracida, M., Sandoval-Torres, S., & Barriada-Bernal, G. (2017). Convective drying kinetics of strawberry (Fragaria ananassa): Effects on antioxidant activity, anthocyanins and total phenolic content. *Food Chemistry*, 230, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.03.010>
- Menon, A., Stojceska, V., & Tassou, S. A. (2020). Una revisión sistemática sobre los avances recientes en las mejoras de eficiencia energética en tecnologías de secado de alimentos no convencionales. *Trends in Food Science and Technology*, 100(October 2019), 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.014>
- Messina, S., González, F., Saldaña, C., Peña-Sandoval, G. R., Tadeo, H., Juárez-Rosete, C. R., & Nair, P. K. (2022). Solar powered dryers in agricultural produce processing for sustainable rural development worldwide: A case study from Nayarit-Mexico. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 3(100027). <https://doi.org/10.1016/j.clcb.2022.100027>
- Milosavljević, D. M., Mutavdžić, D. R., Radotić, K., Milivojević, J. M., Maksimović, V. M., & Dragišić Maksimović, J. J. (2020). Phenolic Profiling of 12 Strawberry Cultivars Using Different Spectroscopic Methods. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(15), 4346–4354. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b07331>
- Muñiz, V., Stephania, V., Santiago, A. D., Barrios, B., Alberto, J., Elsa, E., Palacios, F., Jael, A., Peña, M., Ricardo, J., Solórzano, G., & Aarón, L. (2023). Análisis de las ventajas de prototipos de secadores solares para la deshidratación de alimentos de origen vegetal. *Revista Digital*, 15(2), 910–923. <https://www.researchgate.net/publication/371292348>

- Nair, P. K., Espinosa-Santana, A. L., Guerrero-Martínez, L., López-Ortiz, A., & Nair, M. T. S. (2020). Prospects toward UV-blue filtered solar drying of agricultural farm produce using chemically deposited copper chalcogenide thin films on cellular polycarbonate. *Solar Energy*, 203(December 2019), 123–135. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.012>
- Navarrete Salgado, M., López-Ortiz, A., & K, N. P. (2021). Effect of solar drier with UV-Vis filter on the antioxidant activity and anthocyanins of strawberry and blackberry pulp. *Instituto de Energías Renovables*. <https://library.csbe-scgab.ca/docs/meetings/2021/CSBE21617.pdf>
- Ortiz-Rodríguez, N. M., Condorí, M., Durán, G., & García-Valladares, O. (2022). Solar drying Technologies: A review and future research directions with a focus on agroindustrial applications in medium and large scale. *Applied Thermal Engineering*, 215(118993). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118993>
- Ortiz Quezada, M. J., Romo Cristerna, K. A., Arellano Carrera, E. U., García Saldívar, V. M., García Gonzáles, J. M., & Carranza Concha, J. (2019). Deshidratación de manzana Granny Smith a partir de dos tecnologías de secado. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos Deshidratación*, 4, 416–421.
- Ozcelik, M. M., Ozkan, G., & Karacabey, E. (2022). Evaluation of Carbonic Maceration Effect as a Pre-Treatment on the Drying Process of Strawberry. *Agriculture (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/agriculture12122113>
- Parra-Palma, C., Morales-Quintana, L., & Ramos, P. (2020). Phenolic content, color development, and pigment-related gene expression: A comparative analysis in different cultivars of strawberry during the ripening process. *Agronomy*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/agronomy10040588>
- Rakyat, M., Yeunyongkul, P., Wuttikid, K., Promdan, S., Nuntapap, N., Chaichana, C., Hokpunna, A., Chungcharoen, T., Ruttanadech, N., Srichai, P., & Munsin, R. (2021). Study of air distribution in tray dryer using computational fluid dynamics. *Engineering and Applied Science Research*, 48(6), 684–693. <https://doi.org/10.14456/easr.2021.69>
- Ramírez, J. D. R., Alemán, J. D. C., González, J. M. G., Reyes, S. T., & Carillo, M. C. (2019). Deshidratación de tuna blanca en forma de rodaja mediante radiación solar en un secador directo. *Revista de Energía Química y Física*, 14–18. <https://doi.org/10.35429/jcpe.2019.21.6.14.18>
- Rangani, S. C., & Ranaweera, K. K. D. S. (2023). Incorporation of natural antioxidants extracted from strawberry, cinnamon, beetroot, and ginger; into virgin coconut oil for expansion of its shelf life. *Applied Food Research*, 3(2), 100325. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100325>
- Rehman, A., Majeed, U., Shafi, A., Shahbaz, M., Baboo, I., Sultan, R., Manzoor, Z., Munir, M. M., Saif, I., Qureshi, T. M., Majeed, H., Değirmencioglu, A., Kallinger, D., & Lackner, M. (2024). Evaluation of antioxidant capacity and bioactive compounds in *Capsicum annum* L. red peppers following drying in a polycarbonate greenhouse. *Eurobiotech Journal*, 8(1), 12–22. <https://doi.org/10.2478/ebtj-2024-0002>

- Rehman, S., & Rubab, S. (2020). Effect of Solar Radiation on the Drying Parameters of Mint (*Mentha Spicata* L.) Dried in Natural Convective Solar Dryer. *Research Square*, 1–17. <https://doi.org/https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-117400/v1>
- Rivas, F. J. M. (2021). *Caracterización funcional de mecanismos reguladores del proceso de la maduración del fruto de fresa* [Universidad de Cordoba]. <https://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/21230>
- Rodríguez-Ramírez, J., Méndez-Lagunas, L. L., López-Ortiz, A., Muñiz-Becerá, S., & Nair, K. (2021). Solar drying of strawberry using polycarbonate with UV protection and polyethylene covers: Influence on anthocyanin and total phenolic content. *Solar Energy*, 221(April), 120–130. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.025>
- Roratto, T. B., Monteiro, R. L., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2021). An innovative hybrid-solar-vacuum dryer to produce high-quality dried fruits and vegetables. *LWT*, 140, 110777. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110777>
- Roustaei, N. (2024). Application and interpretation of linear-regression analysis. *Medical Hypothesis discovery and innovation in ophthalmology*, 13(3), 151–159. <https://doi.org/10.51329/mehdiophthal1506>
- Rovirosa, J. E. C. (2017). *Planeación agrícola nacional de FRESA Mexicana*. <https://www.gob.mx/agricultura/documentos/planeacion-agricola-nacional-2017-2030?state=published>
- Roy, S., Ramakrishnan, R., Goksen, G., Singh, S., & Łopusiewicz, Ł. (2024). Recent progress on UV-light barrier food packaging films – a systematic review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 91, 103550. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103550>
- Sadik, H., Ouazzani, C., Moustaghfir, A., El Ghammarti, S., Er-Ramly, A., Essebbahi, I., Dami, A., & Balouch, L. (2023). Comparison of the nutritional proprieties of commercial strawberries, red and black raspberry consumed in Morocco. *Applied Food Research*, 3(2), 100362. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100362>
- Sanchez, I., & Torres, R. (2020). Calor solar para procesos industriales: Estudio de potencial en la industria de conservas alimenticias en México. En H. Ortega, D. Rebollar, & E. Paniagua (Eds.), *Cámara Nacional de la Industria de Conservas Alimenticias* (SK3 Estudi, p. 21). <https://calorsolar.mx/wp-content/uploads/2020/06/GIZ-Estudio-potencial-CANAINCA-2020.pdf>
- Serrano, M. A., & Moreno, J. C. (2020). Spectral transmission of solar radiation by plastic and glass materials. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 208(April), 111894. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2020.111894>
- Serrate, F. C. (2020). Actividad del agua en alimentos: concepto, medida y aplicaciones. *Universidad Politécnica de Valencia*, 1–6. <https://doi.org/10.2307/j.ctv2cmr9j1>
- Talens, P. (2017). Evaluación del color y tolerancia de color en alimentos a través del espacio CIELAB. *Universidad Politécnica de Valencia*, 1–7. <https://riunet.upv.es/handle/10251/83392>

- Tang, B., Ma, J., Liu, L., Xu, J., Zhang, H., Li, K., Tu, X., & Guan, Q. (2025). Preparation of pullulan-shellac edible films with improved water-resistance and UV barrier properties for Chinese cherries preservation. *Journal of Future Foods*, 5(1), 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2024.01.010>
- Téllez, J. C., Hernández, D. M. T., Martínez, C. S. C., González, J. M. G., & Concha, J. C. (2024). Influencia en la capacidad antioxidante de los fenoles totales, vitamina c y color en frutas. *Fitotecnia Mexicana*, 47(1), 19–26. <https://doi.org/https://revistafitotecniamexicana.org/47-1.html>
- Tenorio-Reyes, S., Robles-Ramírez, J. D., Carrera-Arellano, E. U., Cortez-Muñoz, J. M., Carranza-Téllez, J., & García-González, J. M. (2020). Deshidratación de kiwi (*Actinidia chinensis*) mediante radiación solar en un secador directo. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 5, 149–153.
- Tenorio-Reyes, S., Robles-Ramírez, J. D., Carrera-Arellano, E. U., García-González, J. M., & Carranza-Concha, J. (2019). Deshidratación de pera en forma de rodaja en un secador solar directo. *JEEOS*, 1–10. <https://doi.org/10.19136/Jeeos.a3n1.3265>
- Turmanidze, T., Jgenti, M., Gulua, L., & Shaiashvili, V. (2017). Effect of ascorbic acid treatment on some quality parameters of frozen strawberry and raspberry fruits. *Annals of Agrarian Science*, 15(3), 370–374. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.02.017>
- Valladares, Octavio Garcia, & Figueroa, I. P. (2017). *Aplicaciones térmicas de la energía solar* (G. R. Coria (ed.); Juan Tonda). Biblioteca Nacional de México. <http://www.fordecyt.ier.unam.mx/pdf/pdfTermoSolar.pdf>
- Vazquez, J. D. C. (2023). *Secado Solar de Pera a Cielo abierto y su comparación usando un deshidratador solar mixto tipo gabinete* [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2023/febrero/0835212/Index.html>
- Venkateswarlu, K., & Reddy, S. V. K. (2024). Recent trends on energy-efficient solar dryers for food and agricultural products drying: a review. *Waste Disposal and Sustainable Energy*, 6(3), 335–353. <https://doi.org/10.1007/s42768-024-00193-3>
- Vera Zambrano, M., Dutta, B., Mercer, D. G., MacLean, H. L., & Touchie, M. F. (2019). Assessment of moisture content measurement methods of dried food products in small-scale operations in developing countries: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 88(July 2018), 484–496. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.006>
- Zhu, X., Trouth, F., & Yang, T. (2023). Preharvest UV-B Treatment Improves Strawberry Quality and Extends Shelf Life. *Horticulturae*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/horticulturae9020211>

ANEXOS

Anexo A: Concentración promedio del contenido de fenoles totales, antocianinas, ácido ascórbico de las fresa fresca y deshidratada en base seca.

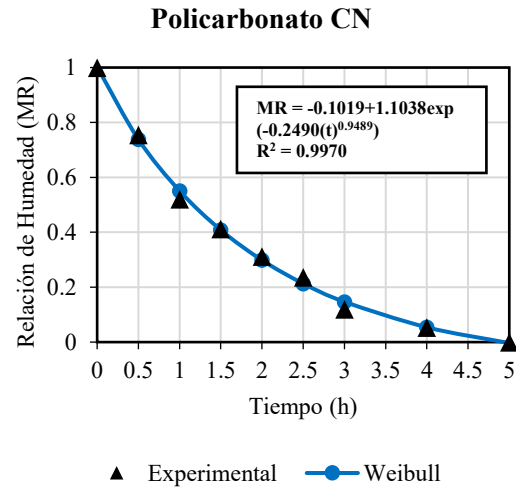
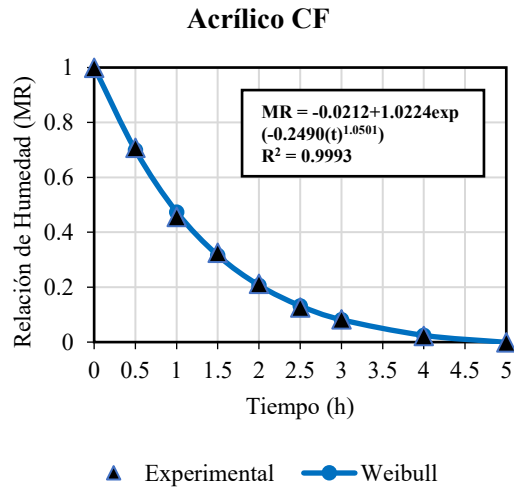
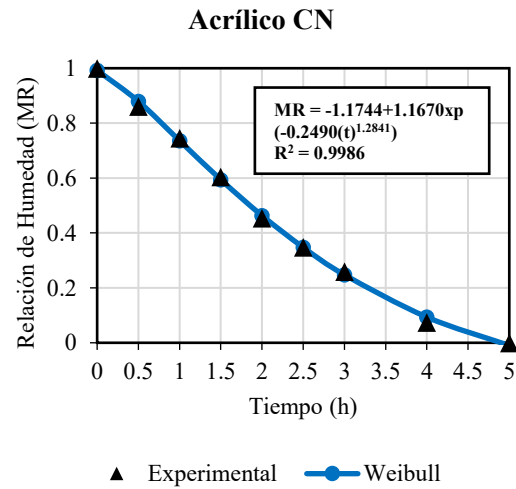
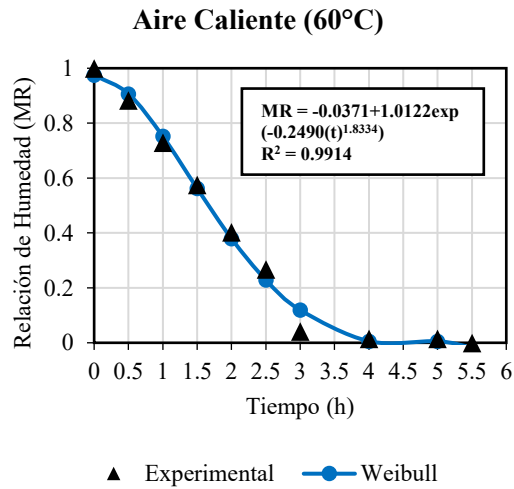
Tabla 21. Fenoles totales, antocianinas y ácido ascórbico para la fresa fresca deshidratada (agosto 2024)

	Fenoles totales (mg GAE /100 g_{ss})	Antocianinas (mg C3GE/100 g_{ss})	Ácido Ascórbico (mg AA/100 g_{ss})
Fresa fresca	48.61±1.189	66.54±4.889	57.33±8.705
Aire caliente	144.6±9.577	46.18±4.305	31.31±7.396
Acrílico CN	134.1±1.291	26.33±1.677	26.50±0.1170
Acrílico CF	131.0±5.338	35.10±1.977	26.58±0.2489
Policarbonato CN	172.4±4.618	38.58±3.270	40.27±0.3416
Policarbonato CF	148.8±7.532	51.67±1.265	40.24±0.6263

Tabla 22. Fenoles totales, antocianinas y ácido ascórbico para la fresa fresca deshidratada (febrero 2025)

	Fenoles totales (mg GAE /100 g_{ss})	Antocianinas (mg C3GE/100 g_{ss})	Ácido Ascórbico (mg AA/100 g_{ss})
Fresa fresca	29.74±1.207	41.90±4.586	47.36±3.455
Aire caliente	170.7±3.966	28.25±1.273	31.79±3.742
Acrílico CN	160.7±3.120	11.72±0.7124	27.04±0.295
Acrílico CF	149.7±5.646	10.61±1.279	22.83±4.054
Policarbonato CN	156.6±1.964	26.71±0.884	31.03±3.815
Policarbonato CF	154.2±11.19	22.72±0.875	22.69±3.986

Anexo B: Modelo de ajuste de Weibull para las cinéticas experimentales de agosto del 2024



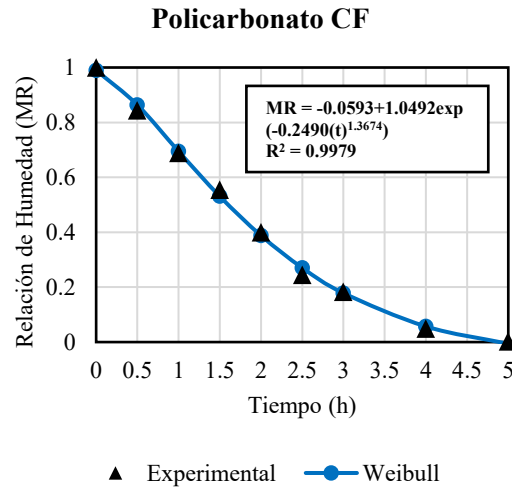
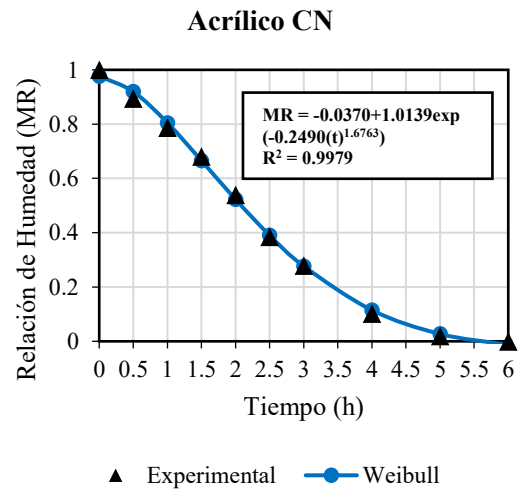
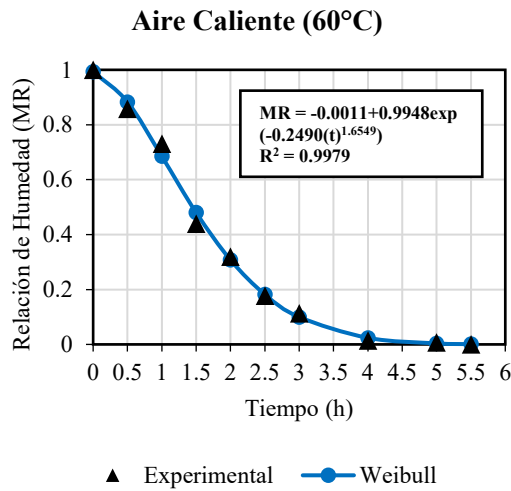


Figura 55. Modelo de ajuste de Weibull para los secadores de agosto del 2024.

Modelo de ajuste de Weibull para las cinéticas experimentales de febrero del 2025



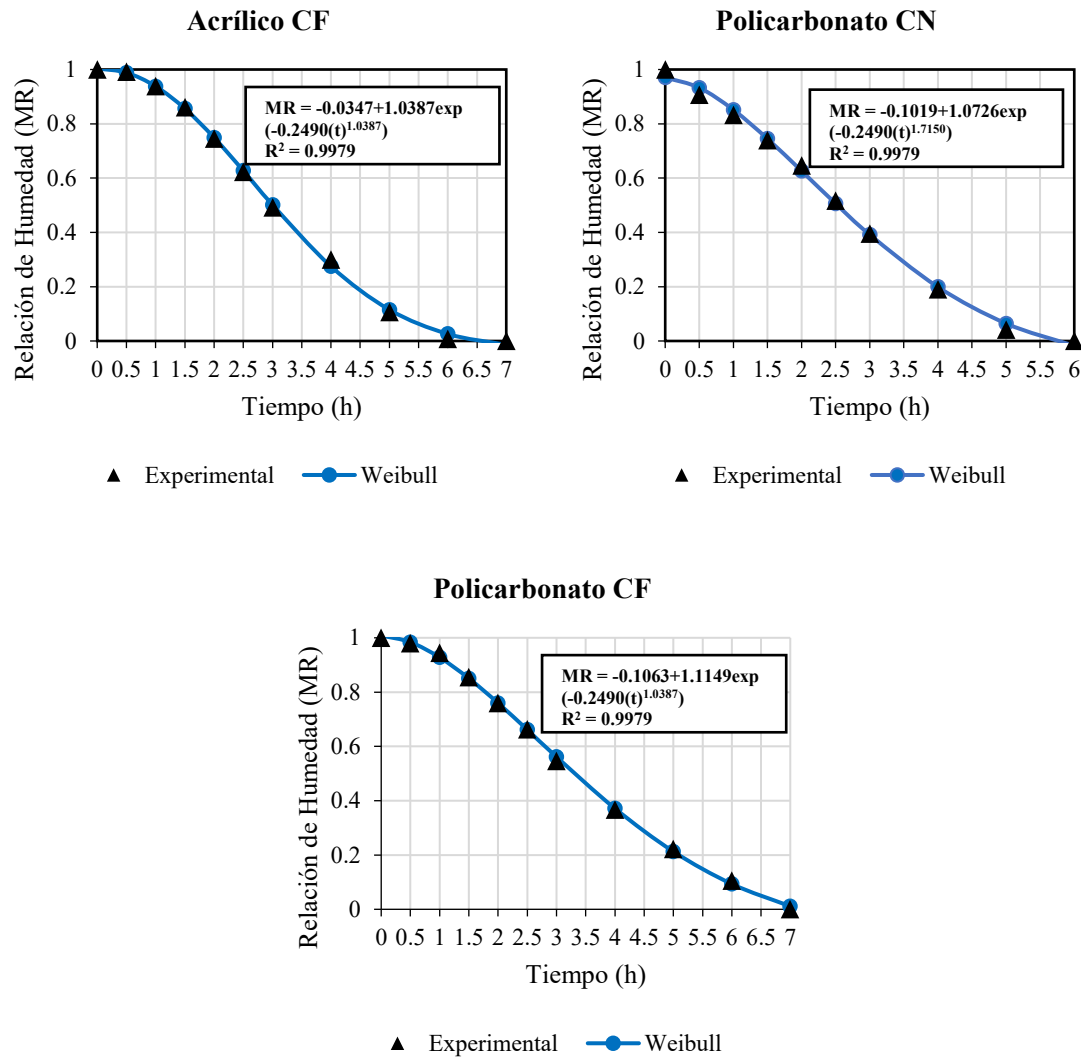


Figura 56. Modelo de ajuste de Weibull para los secadores de febrero del 2025.