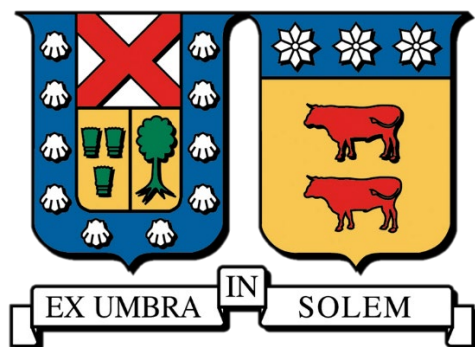


**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL**  
**VALPARAÍSO – CHILE**



# **“DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE UN SECADOR HIDROCONDUCTIVO ACOPLADO A MICROONDAS”**

**ROCÍO FLORENCIA VALLEJOS COLLÍO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERA CIVIL QUÍMICA**

**PROFESOR GUÍA: Dr. CRISTIAN RAMÍREZ**  
**PROFESOR CORREFERENTE: MARLENE PINTO**

**JULIO 2024**

## Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi familia por acompañarme durante la vida universitaria, por intentar comprender mi estrés a través del cariño y silencio para poder realizar los informes de tantos ramos, estudiar para certámenes y descansar cuando fuera necesario, gracias por estar y existir en mi vida. En especial, aunque no puedan leer esto, quiero agradecer a mis compañeras perrunas Flopi y Suki, por siempre recibirme felices y con amor incondicional, no sé qué habría sido de mí sin las sesiones de cariño bajo el sol disfrutando del presente y olvidándome de los problemas.

Quiero agradecer a los profesores con los que me tope en este camino, quienes me motivaron a seguir adelante y esforzarme para cumplir mis objetivos, aunque ellos no lo sepan su confianza en mí fue una gran motivación; su mirada positiva de la vida y escuchar sus historias de vida me inspiran a seguir buscando el conocimiento y encontrar un área de estudio que me entregue satisfacción. También al equipo de pañol por sus ánimos y saludos.

En general, a quienes alguna vez formaron parte del camino y ya no están, en su momento su compañía hizo más grata la estadía; también a quienes me acompañan durante mi último año de universidad, se aprecia tener buena compañía y cariño después de tanto caos, gracias por apoyarme cuando lo necesitaba y por las risas para hacer la vida más feliz.

Agradecer a todo el equipo del laboratorio de alimentos por su buena disposición para brindarme ayuda y dar ánimos cada vez que podían, a mi profesor guía Cristian Ramírez por confiar en mí desde el día que lo fui a buscar a su oficina y cada vez que requería apoyo durante la realización de este trabajo.

Finalmente, un agradecimiento al proyecto FONDECYT N°1230506 por el financiamiento de este trabajo.

## Resumen

La deshidratación es un área dentro del procesamiento de alimentos en la cual se utiliza comúnmente el secado para lograr este propósito, sin embargo, durante este proceso los alimentos pierden nutrientes y sus propiedades organolépticas cambian, lo cual implica una reducción en sus beneficios a la salud. Por esto, en los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías para obtener alimentos de alta calidad, de manera que se pueda entregar productos que propicien el bienestar de los consumidores.

Una de estas tecnologías es la ventana refractiva (VR), la cual ha permitido obtener productos de excelente calidad en menores tiempo de secado en comparación a métodos tradicionales convectivos. Por otra parte, el secado por microondas (MW) ha demostrado ser eficiente en la reducción de los tiempos de secado y la conservación de calidad, sin embargo, presenta limitaciones como un calentamiento no uniforme de la materia debido a la formación de puntos calientes en su cavidad. Por lo que, el objetivo de la investigación es diseñar y optimizar un sistema híbrido de secado en donde se acopla la ventana refractiva al microondas, utilizando láminas de manzanas Granny Smith como alimento modelo para estudiar la cinética de secado, calidad final y eficiencia energética.

Para lograr el objetivo se utilizan láminas de manzanas de 3 mm de espesor y 40 mm de diámetro pretratadas con un escaldado, las cuales son deshidratadas mediante ventana refractiva como control a una temperatura de 100 °C; mientras que la deshidratación en ventana refractiva acoplada a microondas se realiza a la misma temperatura, usando una potencia de 700 W y 1000 W. El proceso se da por finalizado cuando la humedad es inferior al 10%.

Se obtiene como resultado que al utilizar ventana refractiva acoplada al microondas el tiempo de secado se reduce en un 42% a potencia de 700 W y 67% a potencia de 1000 W, en comparación con ventana refractiva, 60 min. Además, se ajusta la segunda ley de Fick y el modelo de difusión anómalo para describir la cinética de secado del sistema, obteniéndose para este que el coeficiente de difusión efectivo es  $11,7 \pm 3,9 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  para 700 W y  $15,7 \pm 1,4 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  para 1000 W, mientras que para ventana refractiva es  $5,7 \pm 0,9 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ .

En el caso de los parámetros de calidad se tiene una disminución en el contenido de polifenoles totales en comparación a la materia prima, para ventana refractiva disminuye en un 20%; para 700 W un 1% y para 1000 W un 11%. La capacidad antioxidante también disminuye en un 63% para ventana refractiva, 50% para 700 W y 55% para 1000 W. En específico se determina que el secado con microondas a 700 W conserva mejor las propiedades de la manzana. Además, se percibe una diferencia de color significativa entre las muestras de los secados y la materia prima.

Finalmente, se concluye que el secado con ventana refractiva acoplado a microondas presenta mejores parámetros de calidad y tiempos de secado que la ventana refractiva, haciéndolo un sistema de secado más eficiente.

# Índice

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| Agradecimientos.....                                                   | 2  |
| Resumen .....                                                          | 3  |
| Índice .....                                                           | 4  |
| Índice de Tablas.....                                                  | 6  |
| Índice de Figuras .....                                                | 6  |
| 1. Introducción.....                                                   | 9  |
| 1.1 Objetivos.....                                                     | 10 |
| 1.1.1 Objetivo general: .....                                          | 10 |
| 1.1.2 Objetivos específicos:.....                                      | 10 |
| 2. Antecedentes teóricos.....                                          | 12 |
| 2.1. Deshidratación de alimentos.....                                  | 12 |
| 2.2. Técnicas de secado .....                                          | 12 |
| 2.2.1. Ventana refractiva.....                                         | 13 |
| 2.2.2. Microondas .....                                                | 15 |
| 2.2.3. Sistemas híbridos.....                                          | 17 |
| 2.3. Procesos difusivos .....                                          | 18 |
| 2.3.1. Segunda Ley de Fick .....                                       | 19 |
| 2.3.2. Difusión anómala.....                                           | 19 |
| 2.4. Parámetros de calidad en alimentos deshidratados.....             | 20 |
| 2.4.1. Contenidos de polifenoles totales .....                         | 20 |
| 2.4.2. Capacidad antioxidante.....                                     | 21 |
| 2.4.3. Color .....                                                     | 23 |
| 2.4.4. Actividad de agua .....                                         | 24 |
| 2.5. Capacidad de procesamiento y eficiencia energética .....          | 24 |
| 3. Metodología.....                                                    | 26 |
| 3.1. Determinación parámetros de operación .....                       | 26 |
| 3.2. Caracterización y preparación materia prima .....                 | 27 |
| 3.3. Secado con ventana refractiva (VR).....                           | 27 |
| 3.4. Secado con ventana refractiva acoplado a microondas (VR+MW) ..... | 28 |
| 3.5. Perfil de temperatura .....                                       | 29 |
| 3.6. Actividad del agua .....                                          | 30 |

|        |                                                                                         |    |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.7.   | Contenido de humedad .....                                                              | 30 |
| 3.8.   | Calidad producto final .....                                                            | 31 |
| 3.8.1. | Contenido total de polifenoles.....                                                     | 31 |
| 3.8.2. | Capacidad antioxidante.....                                                             | 33 |
| 3.8.3. | Determinación de color .....                                                            | 34 |
| 3.9.   | Análisis estadístico .....                                                              | 35 |
| 4.     | Resultados y discusión.....                                                             | 37 |
| 4.1.   | Determinación de tiempos de secado .....                                                | 37 |
| 4.2.   | Curvas de secado .....                                                                  | 38 |
| 4.3.   | Determinación coeficiente de difusividad .....                                          | 40 |
| 4.4.   | Comparación de parámetros de calidad.....                                               | 43 |
| 4.4.1. | Contenido de polifenoles totales.....                                                   | 43 |
| 4.4.2. | Capacidad antioxidante.....                                                             | 45 |
| 4.4.3. | Color .....                                                                             | 47 |
| 4.4.4. | Actividad de agua .....                                                                 | 49 |
| 4.5.   | Perfiles de temperatura .....                                                           | 50 |
| 4.6.   | Capacidad de procesamiento y eficiencia energética .....                                | 51 |
| 5.     | Conclusiones.....                                                                       | 54 |
| 6.     | Recomendaciones .....                                                                   | 55 |
| 7.     | Referencias .....                                                                       | 56 |
| 8.     | Anexos .....                                                                            | 61 |
| 8.1.   | Anexo 1: Sistema de extracción de aire en ventana refractiva acoplada a microondas..... | 61 |
| 8.2.   | Anexo 2: Curvas de secado .....                                                         | 61 |
| 8.3.   | Anexo 3: Curva de calibración de ácido gálico equivalente .....                         | 63 |
| 8.4.   | Anexo 4: Curva de calibración Trolox equivalente.....                                   | 63 |
| 8.5.   | Anexo 5: Tabla resumen parámetros de calidad.....                                       | 64 |
| 8.6.   | Anexo 6: Curvas de temperatura .....                                                    | 64 |

## Índice de Tablas

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Tecnologías de secado por generación (Barbosa-Cánovas & Juliano, 2004) .....                | 13 |
| Tabla 2. Resumen de tecnologías de secado híbrido (Hii, Ong, Yap, Putranto, & Mangindaan, 2021)..... | 18 |
| Tabla 3. Perceptibilidad en la diferencia de color ( $\Delta E$ ) (López & Di Sarli, 2016) .....     | 23 |
| Tabla 4. Diseño experimental.....                                                                    | 26 |
| Tabla 5. Tiempo de secado de experimentos.....                                                       | 38 |
| Tabla 6. Coeficiente de difusividad efectivo según segunda ley de Fick por experimento .             | 41 |
| Tabla 7. Coeficiente de difusividad efectivo según modelo de difusión anómalo por experimento .....  | 41 |
| Tabla 8. Parámetros del espacio CIELAB según método de secado.....                                   | 48 |
| Tabla 9. Resumen perfiles de temperatura .....                                                       | 50 |
| Tabla 10. Energía consumida y necesaria por batch según potencia de secado en VR+MW .....            | 51 |
| Tabla 11. Tabla resumen parámetros de calidad .....                                                  | 64 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Diagrama de ventana refractiva (Nindo & Tang, 2007) .....                                                                         | 14 |
| Figura 2. Diagrama de transferencia de calor en ventana refractiva (Nindo & Tang, 2007)14                                                   |    |
| Figura 3. Diagrama de secador por microondas industrial (Guzik, Kulawik, Zajac, & Migdał, 2022).....                                        | 15 |
| Figura 4. Mecanismos de calentamiento por microondas (Brittany, 2002).....                                                                  | 16 |
| Figura 5. Distribución de temperatura en la cavidad de un microondas (Feng, Yin, & Tang, 2012).....                                         | 17 |
| Figura 6. Ensayo de Folin-Ciocalteu (F-C) (Bibi Sadeer, Montesano, Albrizio, Zengin , & Mahomoodally, 2020) .....                           | 21 |
| Figura 7. Mecanismo de reacción DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) (Bibi Sadeer, Montesano, Albrizio, Zengin , & Mahomoodally, 2020)..... | 22 |
| Figura 8. Espacio de colores CIELAB (Miranda, 2018) .....                                                                                   | 23 |
| Figura 9. Ventana refractiva utilizada en laboratorio .....                                                                                 | 27 |
| Figura 10. Sistema de secado hidroconductor acoplado a microondas en laboratorio .....                                                      | 28 |
| Figura 11. Ventana refractiva al interior del microondas .....                                                                              | 28 |
| Figura 12. Medidor de Radiación Electromagnética Tenmars Tm195 .....                                                                        | 29 |
| Figura 13. OMEGA Engineering TC-08 .....                                                                                                    | 29 |

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 14. Interrogador Luna's HYPERION si155.....                                                           | 30 |
| Figura 15. Rotronic hygropalm HP21 .....                                                                     | 30 |
| Figura 16. Desecador con muestras de manzana en su interior.....                                             | 31 |
| Figura 17. Espectrofotómetro marca SPECTRONIC ® GENESIS <sup>TM</sup> 5 .....                                | 32 |
| Figura 18. Colorímetro Minolta CR-400/410.....                                                               | 34 |
| Figura 19. Contenido de agua en el tiempo .....                                                              | 37 |
| Figura 20. Curva de secado experimental y teórica para segunda ley de Fick.....                              | 39 |
| Figura 21. Curva de secado experimental y teórica para modelo anómalo.....                                   | 39 |
| Figura 22. Curva de secado experimental y teórica para modelo anómalo con $\alpha=1,092$ .....               | 40 |
| Figura 23. Contenido de polifenoles totales por experimento.....                                             | 43 |
| Figura 24. Capacidad Antioxidante por experimento.....                                                       | 45 |
| Figura 25. Diferencia de color por experimento.....                                                          | 47 |
| Figura 26. Color materia prima .....                                                                         | 48 |
| Figura 27. Color con VR .....                                                                                | 48 |
| Figura 28. Color VR+MW 700 W.....                                                                            | 48 |
| Figura 29. Color VR+MW 1000 W.....                                                                           | 48 |
| Figura 30. Actividad de agua ( $a_w$ ) por experimento .....                                                 | 49 |
| Figura 31. Sistema de extracción de aire Nagashi modelo DP200A.....                                          | 61 |
| Figura 32. Curva de secado experimental y teórica para segunda ley de Fick sin norma AOAC .....              | 61 |
| Figura 33. Curva de secado experimental y teórica para modelo anómalo sin norma AOAC .....                   | 62 |
| Figura 34. Curva de secado experimental y teórica para modelo anómalo con $\alpha=1,092$ sin norma AOAC..... | 62 |
| Figura 35. Curva de calibración ácido gálico equivalente.....                                                | 63 |
| Figura 36. Curva de calibración Trolox equivalente .....                                                     | 63 |
| Figura 37. Curva de temperatura agua para experimentos .....                                                 | 64 |
| Figura 38. Curva de temperatura lámina de manzana para experimentos.....                                     | 65 |

# Capítulo I

---

## Introducción

## 1. Introducción

En la industria alimenticia la conservación de los alimentos es un tema relevante, esto debido a que permite generar productos de valor agregado, entregar una variedad de productos a los consumidores, extender la vida útil de los alimentos y disponer de alimentos fuera de época de cultivo en cualquier momento del año.

Uno de los métodos más comunes de conservación de los alimentos es el secado, proceso que reduce la actividad del agua ( $a_w$ ) mediante la remoción de esta, generando alimentos secos y sólidos. Una de las ventajas de este método es que permite la disminución de costos de procesamiento, empaque, almacenaje y transporte; mientras que preserva los alimentos al evitar el crecimiento de microorganismos y la generación de reacciones químicas que alteran la calidad final de los productos (Rahman, 2020).

Existen diversas tecnologías de secado, las cuales se pueden dividir en convencionales y novedosas, las primeras corresponden a métodos que se basan principalmente en la convección para el secado, con gases de combustión o aire caliente como medio de la transferencia de calor; a pesar de uso generalizado en la industria, existen algunas problemáticas asociadas a su alto consumo energético junto con la calidad del producto en lo que respecta a valor nutricional, propiedades organolépticas y posibilidades de contaminación, es por esto que en los últimos años se han desarrollado tecnologías novedosas que buscan mejorar estas problemáticas, además de sumar otros beneficios como reducción de tiempos de secado, menores costos de producción, aumento de la capacidad de procesamiento, entre otros (Moses et al., 2014).

La ventana refractiva (VR) es un nuevo método que permite secar diversos tipos de alimentos en un corto periodo de tiempo, su principio de funcionamiento se basa en la transferencia de calor mediante convección, conducción y radiación; los productos que se obtienen son de alta calidad con excelente retención de color, vitaminas y antioxidantes; además, el sistema es considerado simple y de bajo costo en comparación a otras alternativas (Nindo & Tang, 2007).

El secado por microondas (MW) es un método que se usa generalmente en conjunto con otras tecnologías de secado, en este los materiales absorben la energía de las ondas y los calientan de forma volumétrica; su uso permite reducir el tiempo del proceso y sus costos, además de mantener las propiedades de los alimentos (Guzik et al., 2022).

En consecuencia, se propone el uso complementario de ambas tecnologías, es decir, implementar un sistema híbrido entre la ventana refractiva y el secado por microondas, con la finalidad de obtener productos de alta calidad, con un menor tiempo de secado y mayor eficiencia energética. Para lograr esto se proponen los siguientes objetivos:

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo general:

Diseñar y optimizar mediante un secador hidro conductivo acoplado a microondas la deshidratación de láminas de manzana, evaluando su cinética de secado y analizando la calidad final del producto.

### 1.1.2 Objetivos específicos:

- Diseñar e implementar el secado de láminas de manzana mediante un secador hidro conductivo acoplado a microondas.
- Analizar el perfil de temperaturas del sistema y del producto.
- Determinar la capacidad de procesamiento del sistema y su eficiencia energética.
- Evaluar el efecto de la potencia de microondas en el tiempo de secado.
- Evaluar la calidad final del producto.
- Evaluar las curvas de secado mediante un análisis matemático del modelo de Fick y modelo anómalo para placa plana.

## Capítulo II

---

### Antecedente teóricos

## 2. Antecedentes teóricos

### 2.1. Deshidratación de alimentos

La deshidratación de alimentos es uno de los métodos más antiguos empleados para la preservación de alimentos en el mundo, este proceso se realiza mediante la remoción del agua presente en los alimentos hasta cierto nivel donde se puede mantener su calidad nutricional y evitar el crecimiento de microorganismos, reduciendo así el peso y volumen de estos; lo cual permite adicionalmente reducir los costos de empaque y transporte de los alimentos.

Los principales alimentos en los que se emplea este proceso son frutas y verduras, las cuales son fuentes esenciales de nutrientes en la dieta humana, el principal desafío en la conservación de estos bienes es su alto porcentaje de humedad, siendo superior al 80%, por lo que son muy perecibles. Una opción para mantener frescos estos alimentos es almacenarlos a bajas temperaturas, conservando de esta manera la calidad de los productos, sin embargo, esto requiere el uso de una gran cantidad de energía y un buen manejo del sistema de distribución, por lo tanto, se prefiere el secado de estos (Orsat, Changrue, & Raghavan, 2006).

### 2.2. Técnicas de secado

El secado es una operación compleja donde ocurre transferencia de calor y masa simultáneamente, en este el agua es removida mediante la aplicación de calor, resultando en un producto sólido en forma de lámina, polvo y/o hojuelas. Tradicionalmente los objetivos principales de esta operación han sido la inhibición del crecimiento de microorganismos, reducción de reacciones químicas dañinas, facilitar el almacenaje y reducir los costos de transporte (Bernaert, Van Droogenbroeck, Van Pamel, & De Ruyck, 2019).

En la actualidad, se busca adicionalmente mantener la calidad de los productos debido a la demanda de los consumidores por alimentos que promueven beneficios a la salud; por lo que uno de los principales criterios que se considera en el presente para el desarrollo de nuevas tecnologías de secado es la calidad del producto, ya sea en sus propiedades nutricionales u organolépticas. Además, uno de los desafíos principales en la actualidad es el consumo de energía, debido a las limitaciones en su generación y la contaminación generada por el uso de combustibles fósiles para su producción; ocupando el proceso de secado entre un 12% y 20% de la energía en la industria, por lo que la reducción del consumo energético también a tomado relevancia como criterio (Nindo & Tang, 2007).

Uno de los métodos convencionales más utilizados en la industria actualmente es el secado por convección de aire caliente o gases de combustión como medio de transferencia de calor, empleándose sobre un 85% en los secadores industriales, sin embargo, este tipo de secado reduce la calidad final de los productos. Lo anterior, sumado a la demanda de los consumidores ha desembocado en el desarrollo de tecnologías novedosas, en donde se busca preservar la calidad de los alimentos, además de reducir el consumo de energía, acortar los

tiempos de secado, aumentar la capacidad de procesamiento, mejorar la seguridad operacional, reducir la contaminación y reducir los costos de producción (Moses, Norton, Alagusundaram, & et al., 2014).

El desarrollo de los sistemas de secado a través de la historia se puede clasificar en cuatro categorías, las cuales corresponden a primera, segunda, tercera y cuarta generación, siendo esta última la vigente. Los métodos convencionales corresponden a la primera y segunda generación, mientras que los métodos novedosos corresponden a la cuarta generación. A continuación, se presenta en la Tabla 1 los tipos de secado por generación (Barbosa-Cánovas & Juliano, 2004).

*Tabla 1. Tecnologías de secado por generación (Barbosa-Cánovas & Juliano, 2004)*

| <b>1° Generación</b> | <b>2° Generación</b>       | <b>3° Generación</b>    | <b>4° Generación</b>          |
|----------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Secado en horno      | Secador spray              | Liofilizador            | Secador flash                 |
| Secado en bandejas   | Secador de tambor          | Secado al vacío         | Secador microondas            |
| Secado en túnel      | Secado de lecho fluidizado | Deshidratación osmótica | Secado por ventana refractiva |
| Secado rotatorio     |                            |                         | Secador de radiofrecuencia    |
|                      |                            |                         | Secado con sistemas híbridos  |

En el presente trabajo se estudian los métodos de secado por ventana refractiva, secado por microondas y un sistema híbrido donde se acopla un sistema de secado hidroconductor a un microondas, método del cual no se tiene referencia actualmente.

### 2.2.1. Ventana refractiva

La ventana refractiva (VR) es un método patentado y desarrollado por MCD Technologies, Inc. en el año 1986. Ha ganado interés debido a la alta calidad de los alimentos secados, su bajo costo en comparación a otras tecnologías y menor consumo energético, siendo un tercio del costo de un liofilizador y menos de la mitad de consumo energético que este mismo equipo.

Actualmente, este método se utiliza para obtener diversos tipos de productos, como extractos de hierbas, suplementos nutricionales, algas con alto contenido de carotenoides, especias, vegetales, frutas, entre otros.

Su sistema consiste en un volumen circulante de agua caliente (95°-97°C) a presión atmosférica, la cual transfiere la energía térmica al producto húmedo mediante una película

de plástico; el agua caliente es recirculada y reutilizada durante el proceso, por lo que posee una alta eficiencia térmica. En la Figura 1 se tiene un esquema del sistema, que consiste en una banda de plástico movable sobre un volumen de agua caliente, la cual circula a un estanque calefaccionado, para luego ser bombeada nuevamente al sistema, además, se tiene agua de enfriamiento al final de la línea para facilitar la extracción del producto de la película de plástico al disminuir su adherencia, también se tiene un sistema de extracción para el aire húmedo (Nindo & Tang, 2007).

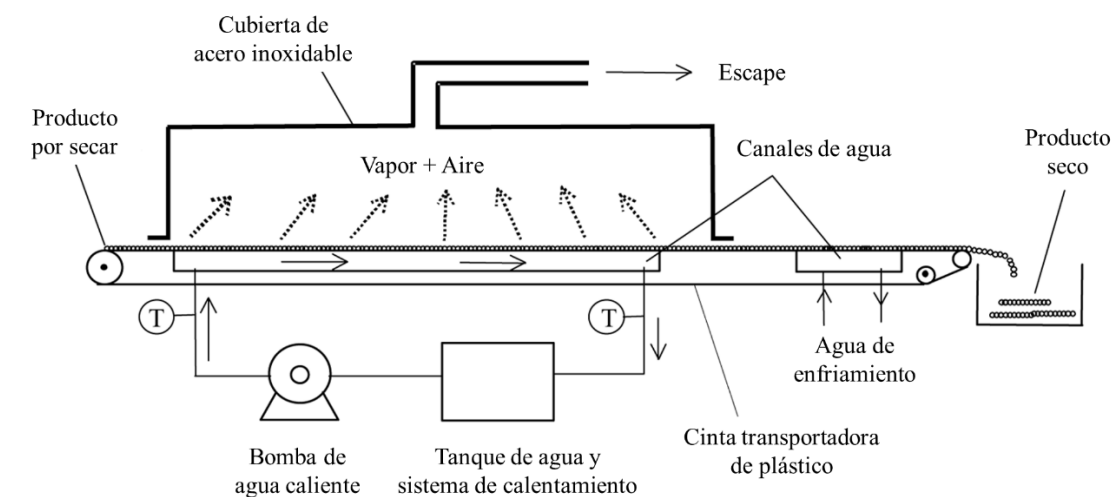


Figura 1. Diagrama de ventana refractiva (Nindo & Tang, 2007)

La transferencia de calor en el sistema se produce mediante conducción ( $q_{\text{cond}}$ ), convección ( $q_{\text{conv}}$ ) y radiación ( $q_{\text{rad}}$ ), el agua caliente conduce la energía a la película de plástico mediante conducción y radiación, mientras que la transferencia de energía del producto al aire se produce por convección y evaporación, lo anterior se puede ver en la Figura 2, donde se tiene una interfase entre el agua, plástico y producto, en la cual se indican los modos de transferencia de calor de cada sección (Moses, Norton, Alagusundaram, & et al., 2014).

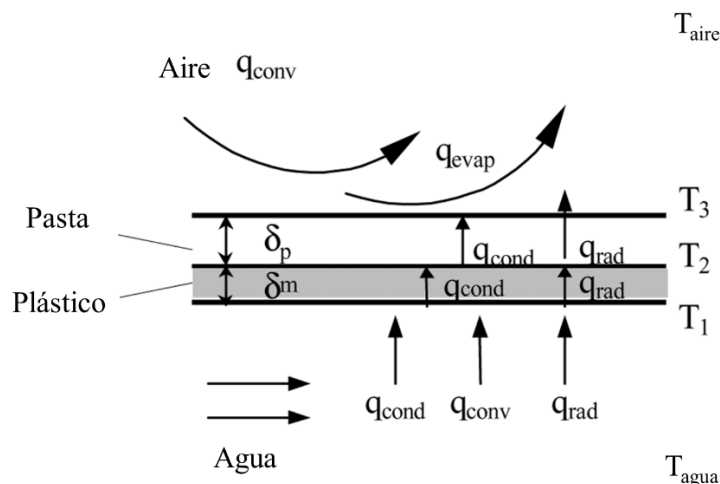


Figura 2. Diagrama de transferencia de calor en ventana refractiva (Nindo & Tang, 2007)

Una de las ventajas de este sistema es la retención de calidad en los producto, tales como color, aroma, sabor y contenido de nutrientes, la cual se debe a la rápida transferencia de masa y calor, la baja temperatura del producto y los bajos tiempos de secado. Se ha probado el secado de diversas frutas y vegetales con esta tecnología, resultando en una excelente calidad de los productos en lo que respecta a contenido de polifenoles, capacidad antioxidante y color, al compararlo con tecnologías típicas de secado usados en la industria de alimentos, como secador spray y congelamiento de alimentos (Bernaert, Van Droogenbroeck, Van Pamel, & De Ruyck, 2019).

### 2.2.2. Microondas

El secado por microondas es un método novedoso de secado que ha ganado interés en el último tiempo, tal como lo indicada su nombre el proceso de deshidratación se basa en las ondas microondas, pertenecientes a la radiación electromagnética.

En la industria se utiliza para pasteurizar, esterilizar, secar y escaldar productos alimenticios, generalmente se emplea junto a otras tecnologías de secado, lo que permite una reducción en los tiempos de secado, costos de producción y consumo energético, mientras se retienen las propiedades organolépticas del producto y se generan cambios mínimos en el contenido nutricional, en comparación a métodos tradicionales (Ekezie, Sun, Han, & Cheng, 2017).

En el secado por microondas, la energía de las microondas es absorbida por el alimento y convertida en calor, lo cual genera un gradiente de temperatura, donde la temperatura en el centro del alimento es mayor, provocando esto la salida del agua hacia la superficie del alimento (Guzik, Kulawik, Zajac, & Migdal, 2022). Los microondas industriales operan entre 915 MHz y 2450 MHz, mientras que los microondas domésticos ocupan una frecuencia de 2450 MHz. En la Figura 3 se tiene un diagrama de un secador por microondas industrial, en este se tiene el magnetón, elemento que genera las microondas; antenas para la distribución de las microondas; sistema de aire caliente; guía de ondas; cinta transportadora y un túnel.

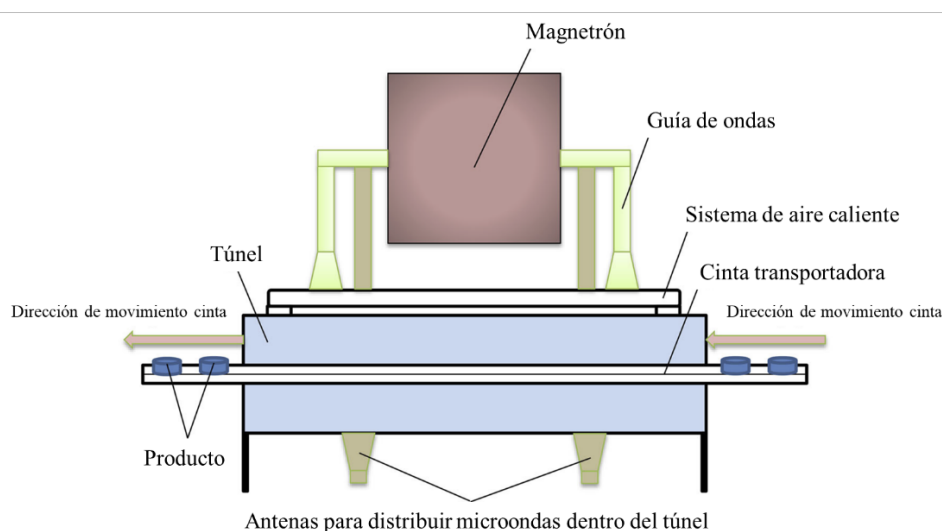


Figura 3. Diagrama de secador por microondas industrial (Guzik, Kulawik, Zajac, & Migdal, 2022)

El calentamiento de los alimentos ocurre mediante dos mecanismos, rotación dipolar y migración de iones; el primer mecanismo ocurre cuando un material húmedo es expuesto a radiación electromagnética, las moléculas dipolares del agua en el material cambian su orientación para intentar alinearse con el campo magnético oscilante, lo que resulta en la generación de fricción entre las moléculas, provocando esto el calentamiento volumétrico del material. Mientras que el segundo mecanismo se basa en la oscilación hacia arriba y abajo de los iones en el campo electromagnético, generando esto que colisionen entre lo que genera calor en el producto (Chandrasekaran, Ramanathan, & Basak, 2013). En la Figura 4 se puede ver el comportamiento descrito de las moléculas en un campo electromagnético oscilante.

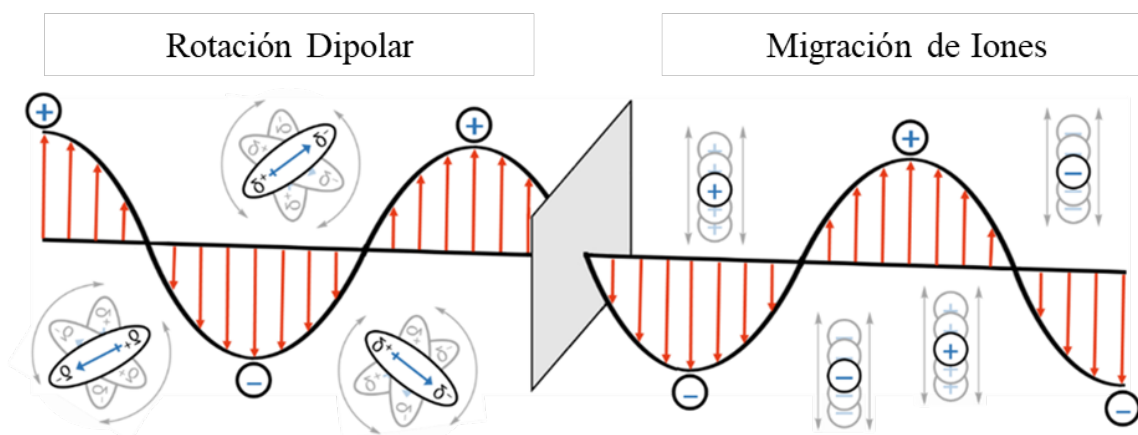


Figura 4. Mecanismos de calentamiento por microondas (Brittany, 2002)

La interacción entre la materia y las microondas puede ser medida por dos parámetros, la constante dieléctrica ( $\epsilon'$ ) y la pérdida dieléctrica ( $\epsilon''$ ), la primera gobierna sobre la distribución del campo electromagnético, es decir, sobre la polarización de las moléculas, mientras que la segunda describe la pérdida de interacciones, es decir, la eficiencia con la cual la radiación electromagnética es convertida en calor (Orsat, Changrue, & Raghavan, 2006). Estos parámetros dependen de la frecuencia, temperatura, contenido de humedad, composición y densidad del material, cuando el contenido de humedad es superior al 70% la rotación dipolar y migración de iones contribuyen al comportamiento dieléctrico, en cambio cuando el contenido de humedad es inferior al 23% la migración de iones domina el comportamiento dieléctrico (Feng, Yin, & Tang, 2012).

Este tipo de secado tiene una serie de ventajas y desventajas, entre las ventajas se tiene un calentamiento volumétrico rápido, mayores velocidades de secado, tiempos de secado cortos, reducción de consumo energético, bajos costos de operación y mejor calidad de producto; mientras que en las desventajas o limitaciones se tiene una pérdida parcial del aroma, cambios en la textura del alimento, alto costo inicial para secadores industriales, requerimientos específicos para un secado efectivo y calentamiento no uniforme de la materia (Orsat, Changrue, & Raghavan, 2006).

Esta última desventaja implica que el alimento no se calienta de forma homogénea, generándose un gradiente de temperatura en el alimento, en donde la temperatura es mayor en el centro y menor al acercarse a los bordes (Joardder, Karim, & Kumar, 2013). Lo anterior, puede ser producto de la geometría y composición del alimento, o por la no uniformidad del campo electromagnético, lo cual se debe a la formación de puntos calientes y fríos en la cavidad del microondas dada la superposición y reflejo de las ondas en las paredes del microondas; todo esto conlleva consecuencias en la calidad de los productos, por lo que se considera como un aspecto a mejorar en este tipo de sistema. En la Figura 5 se tiene la distribución de la temperatura en una cavidad de microondas, en esta se puede observar que en el centro la temperatura es mayor, mientras que en los bordes es menor (Feng, Yin, & Tang, 2012).

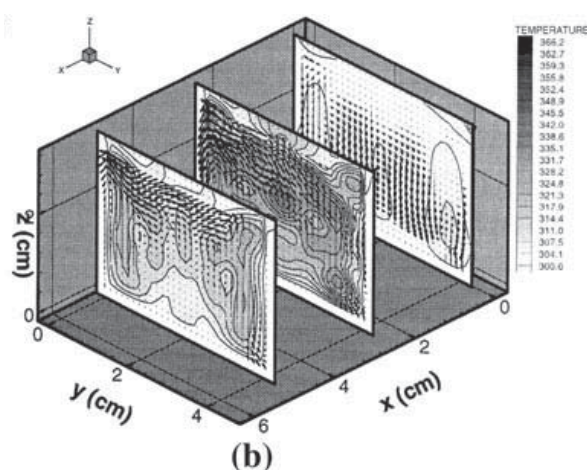


Figura 5. Distribución de temperatura en la cavidad de un microondas (Feng, Yin, & Tang, 2012)

Debido a las limitaciones en el calentamiento de los alimentos el secado por microondas se utiliza en conjunto a otras tecnologías, algunas de estas son secado al vacío, secado con lecho fluidizado, secado por liofilización; la unión de estas tecnologías permite obtener productos de excelente calidad con una mejor eficiencia en el uso de recursos. (Zhang, Jiang, & Lim, 2010)

### 2.2.3. Sistemas híbridos

Los sistemas híbridos de secado contemplan la unión de varias tecnologías de secado o el uso consecutivo de más de un tipo de secado, esto con el objetivo de mejorar la eficiencia del proceso y la calidad de los productos. Este tipo de sistema posee una serie de ventajas sobre los métodos tradicionales de secado, tales como mayor eficiencia de secado, mayor eficiencia energética, procesos de remoción de humedad más eficientes, mejor calidad de productos y mayor retención de nutrientes (Hii, Ong, Yap, Putranto, & Mangindaan, 2021).

A continuación, se presenta en la Tabla 2 algunos sistemas híbridos en el mercado y los productos en lo que ha sido utilizado.

Tabla 2. Resumen de tecnologías de secado híbrido (Hii, Ong, Yap, Putranto, & Mangindaan, 2021)

| <b>Tipo de secado</b>                           | <b>Producto</b>                  |
|-------------------------------------------------|----------------------------------|
| Microondas asistido con aire caliente           | Cerezas                          |
| Microondas asistido con vacío                   | Hojas de <i>Murraya koenigii</i> |
| Microondas asistido con liofilizador            | Láminas de plátano               |
| Microondas asistido con lecho fluidizado        | Semillas de soya                 |
| Microondas asistido con secador spray           | Aceite de palta                  |
| Microondas asistido con deshidratación osmótica | Manzanas                         |

### 2.3. Procesos difusivos

La predicción de los procesos de secado de los alimentos es esencial para mantener la calidad de estos, mejorar el consumo energético y aumentar la capacidad de secado. Para esto existen modelos matemáticos que permiten la representación fenomenológica de los procesos de secado, los cuales son herramientas útiles para el análisis de la transferencia de masa durante el periodo de secado, junto con el diseño y mejoramiento de los procesos de secado (Malekjani, Jafari, Rahmati, Zadeh, & Mirzaee, 2013).

Los procesos difusivos se definen como el movimiento de materia debido a un gradiente de concentración, las moléculas se mueven desde una zona de alta concentración a una de menor concentración, ya sea por diferencia de temperatura, presión o concentración; el secado es uno de estos procesos. Generalmente se utiliza la segunda ley de Fick para modelar el comportamiento fenomenológico de estos procesos, puesto que ha sido ampliamente estudiado a lo largo del tiempo. Sin embargo, los alimentos no cumplen con algunos supuestos de la ley, la cual tampoco considera los cambios estructurales de los alimentos durante el secado (Ochoa-Martínez & Ayala-Aponte, 2005).

En respuesta la limitación de la ley de Fick en el estudio de los alimentos surge un nuevo modelo de cálculo fraccional denominado modelo de difusión anómala, el cual considera los cambios que ocurren en la estructura de los alimentos durante el proceso de secado, como los cambios de volumen, reducción de tamaño y pérdida de humedad (Vega-Castro, y otros, 2023).

### 2.3.1. Segunda Ley de Fick

La segunda ley de Fick se puede representar mediante la Ecuación 1 al suponer una placa infinita.

$$MR_t = \frac{W_t - W_e}{W_0 - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} e^{\left(\frac{-(2i-1)^2 \pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)} \quad (1)$$

Donde:

- MR es la humedad adimensional.
- $W_t$  es el contenido de humedad en cualquier tiempo t, (g agua/g base seca).
- $W_e$  es el contenido de humedad en el equilibrio, (g agua/ g base seca).
- $W_0$  es el contenido de humedad inicial, (g agua/ g base seca).
- $D_{eff}$  es el coeficiente de difusión efectivo, ( $m^2/s$ ).
- t es el tiempo, (s).
- L es la mitad del espesor de la lámina, (m).

Para largos periodos de secado la Ecuación 2 se puede simplificar como:

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{\left(\frac{-\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right)} \quad (2)$$

### 2.3.2. Difusión anómala

El modelo de difusión anómalo, basado el cálculo fraccional, se puede representar mediante la Ecuación 3 (Ramírez, Astorga, Nuñez, Jaques, & Simpson, 2017).

$$\frac{\partial^\alpha W}{\partial t^\alpha} = D_{eff} \frac{\partial^\beta W}{\partial x^\beta} \quad (3)$$

Donde:

- W es el contenido de humedad en el alimento, (g agua/g base seca).
- $D_{eff}$  es el coeficiente de difusión efectivo, ( $m^\alpha/s^\alpha$ ).
- t es el tiempo, (s).
- $\alpha$  está relacionado con los tiempos de espera anómalos entre saltos.
- $\beta$  está relacionado a las longitudes de saltos anómalos.

Está demostrado que la componente del espacio ( $\beta$ ) converge a 2 en alimentos y la componente temporal ( $\alpha$ ) tiene un orden fraccional, por lo que, la Ecuación 4 se puede simplificar como:

$$\frac{\partial^\alpha W}{\partial t^\alpha} = D_{eff} \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \quad (4)$$

Luego, la solución para el modelo se tiene en la Ecuación 5 como:

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{(2i-1)^2} E_a \left( -D_{eff} \left( \frac{(2i-1)\pi}{2L} \right)^2 t^\alpha \right) \quad (5)$$

Donde  $E_a$  corresponde a la función de Mittag-Leffler (ref). Para largos periodos de secado el modelo puede ser simplificado en la Ecuación 6 como:

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} E_a \left( -D_{eff} \left( \frac{\pi}{2L} \right)^2 t^\alpha \right) \quad (6)$$

Cuando  $\alpha$  es igual a uno, la función de Mittag-Leffler converge a la función exponencial, resultando en la Ecuación 7 (Simpson, y otros, 2015).

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{\left( -D_{eff} \left( \frac{\pi}{2L} \right)^2 t^\alpha \right)} \quad (7)$$

En esta ecuación el coeficiente de difusión efectivo tiene las unidades ( $m^2/s^\alpha$ ).

El valor de  $\alpha$  entrega el proceso de difusión que domina el proceso de transferencia de masa, para valores de  $\alpha$  entre 0 y 1,  $0 < \alpha < 1$ , el proceso es subdifusivo; para  $\alpha > 1$  el proceso es súperdifusivo; para  $\alpha$  igual a 1 se considera que el modelo converge a la segunda ley de Fick.

## 2.4. Parámetros de calidad en alimentos deshidratados

La teoría de radicales libres en el envejecimiento, la cual postula que los radicales libres y compuestos oxidantes son los responsables del envejecimiento en los organismos; junto con el estrés oxidativo, desequilibrio entre los antioxidantes y los radicales libres que provoca daño celular ligado a diversas enfermedades; han causado un aumento en el interés por los antioxidantes, compuestos que protegen a las células contra este daño. Este compuesto se encuentra naturalmente en alimentos, por lo que, se ha comenzado a utilizar como un parámetro de calidad de estos (Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2022).

### 2.4.1. Contenidos de polifenoles totales

Los polifenoles se definen como metabolitos secundarios que poseen al menos un anillo aromático con uno o más grupos hidroxilo unidos, estos compuesto se encuentran presentes en frutas, vegetales, cereales y bebestibles; se pueden clasificar a modo general como ácidos fenólicos, flavonoides, estilbenos y lignanos (Belščak-Cvitanović, Durgo, Huđek, Bačun-Družina, & Komes, 2018).

El contenido de polifenoles en las plantas se ve afectado por diversos factores, tales como maduración de la planta; tiempo de cosecha; procesamiento; almacenaje y factores ambientales, como tipo de suelo, exposición a luz solar, lluvia, entre otros. En el caso de las plantas la cáscara contiene una mayor cantidad de polifenoles que sus partes internas (Belščak-Cvitanović, Durgo, Huđek, Bačun-Družina, & Komes, 2018).

El consumo de alimentos con polifenoles es beneficioso para la salud humana, esto debido a que los polifenoles actúan como antioxidantes al neutralizar radicales libres mediante la donación de un electrón o un átomo de hidrógeno, interrumpiendo de esta forma las reacciones oxidantes en los componentes celulares. Además, los polifenoles actúan como agentes quelantes de metales mediante la formación de complejos con metales tóxicos, los cuales son fáciles de expulsar del cuerpo. Existen varios estudios científicos que demuestran que el consumo de alimentos ricos en polifenoles protege contra enfermedades cardiovasculares, el desarrollo de cáncer y enfermedades neurológicas, además de tener efecto antidiabético y contra el envejecimiento (Pandey & Rizvi, 2009).

Existen diversos métodos para medir el contenido total de polifenoles, uno de los más utilizado es el ensayo de Folin-Ciocalteu (F-C), sin embargo, este método es no específico, puesto que otros compuestos presentes en las plantas, como azúcares y ácido ascórbico, pueden reaccionar con el reactivo F-C, cuyo color característico es amarillo. El ensayo basa en una reacción de transferencia de un electrón (SET) entre el reactivo F-C y los compuestos fenólicos, la cual ocurre en un medio alcalino, pH aproximadamente 10; en este la pérdida de un protón del compuesto fenólico produce un ion de fenolato, el cual reduce el reactivo F-C, lo que provoca un cambio en la coloración de la solución desde amarillo a azul (Bibi Sadeer, Montesano, Albrizio, Zengin , & Mahomoodally, 2020). En la Figura 6 se tiene las reacción del ensayo y el cambio de coloración.

Reacción química:

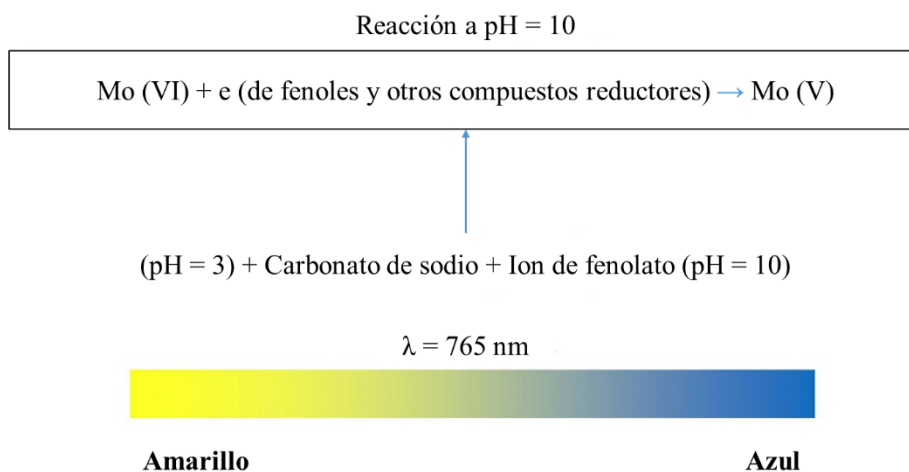


Figura 6. Ensayo de Folin-Ciocalteu (F-C) (Bibi Sadeer, Montesano, Albrizio, Zengin , & Mahomoodally, 2020)

#### 2.4.2. Capacidad antioxidante

Los antioxidantes son compuestos que protegen a las células contra el daño causado por los radicales libres generados por la oxidación de grasas o generados en el cuerpo por la actividad metabólica. Algunos compuestos antioxidantes son betacarotenos, vitaminas, selenio y polifenoles, los cuales se encuentran en una gran variedad de alimentos, tales como frutas, verduras, cereales y alimentos de origen animal; la presencia de estos compuestos es de suma

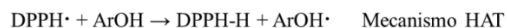
relevancia para mantener un buen estado de salud y evitar enfermedades, por lo que se recomienda el consumo de alimentos ricos en antioxidantes (Fellows, 2017).

La capacidad antioxidante se define como la capacidad de los compuestos y enzimas de disminuir la producción de oxidantes o compuestos reactivos al oxígeno. Existen diversos métodos para medir esta capacidad, sin embargo, la efectividad de los métodos se puede ver afectada por la presencia de otros compuestos y la diferencia de condiciones del medio, como temperatura, pH y composición. (Sadowska-Bartosz & Bartosz, 2022)

Uno de los métodos más utilizados es el método de decoloración del catión radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo), desarrollado por Blois en 1958, mientras que el radical DPPH fue descubierto por Goldschmidt y Renn en 1922, el cual posee la característica de ser sumamente estable, de color púrpura intenso y con una máxima absorbancia a 517 nm. (Foti, 2015)

En los ensayos, este radical es neutralizado aceptando un átomo de hidrógeno (HAT) o un electrón de un compuesto antioxidante (SET), reduciéndose a DPPH-H o DPPH, respectivamente; esta reacción de reducción genera un cambio en la coloración de púrpura a amarillo. En el método, se mide la concentración inicial de la solución mediante la absorbancia con una longitud de onda de 517 nm y después de añadir el compuesto antioxidante, pudiéndose determinar la capacidad antioxidante a través del cambio en la absorbancia (Bibi Sadeer, Montesano, Albrizio, Zengin, & Mahomoodally, 2020). En la Figura 7 se tienen las reacciones del radical DPPH y el mecanismo que ocupa el método (HAT).

Reacción química:



Donde ArOH : antioxidante fenólico

Mecanismo de reacción HAT

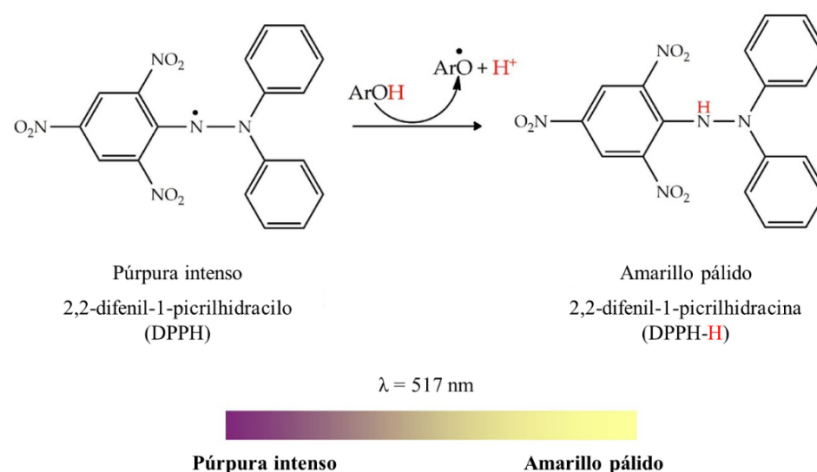


Figura 7. Mecanismo de reacción DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) (Bibi Sadeer, Montesano, Albrizio, Zengin, & Mahomoodally, 2020)

### 2.4.3. Color

El color se define como la longitud de onda en el espectro visible, 390 a 760 nm, que puede detectar el ojo humano. Este parámetro afecta en la percepción de la calidad de los consumidores en los productos alimenticios, pero también puede ser utilizado como indicador del contenido de ciertos compuesto químicos en frutas y verduras (Francis, 1995).

Un método utilizado para cuantificar objetivamente el color es el espacio CIELAB, el cual define al espacio de colores en un sistema cartesiano de tres dimensiones (Ver Figura 8); en este se tienen 3 coordenadas,  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . La coordenada  $L^*$  representa la luminosidad con valores de 0 a 100; la coordenada  $a^*$  indica tonalidades rojas y verdes, un valor positivo corresponde a tonalidades rojas y un valor negativo a tonalidades verdes; finalmente, la coordenada  $b^*$  representa tonalidades amarillas y azules, un valor positivo corresponde a tonalidades amarillas y un valor negativo a tonalidades azules (Vega-Gálvez & et. al, 2012).

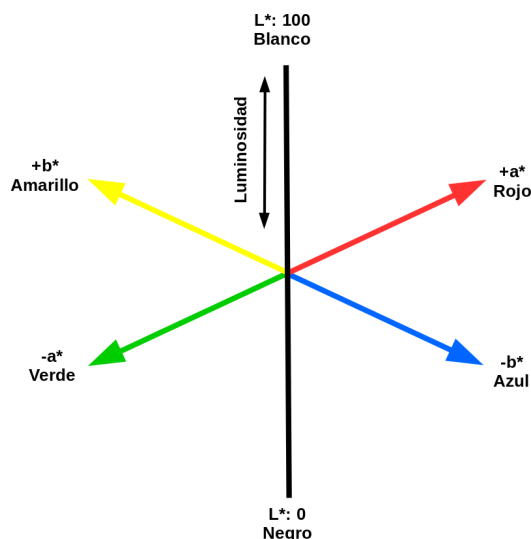


Figura 8. Espacio de colores CIELAB (Miranda, 2018)

La diferencia de color ( $\Delta E$ ) corresponde a la distancia entre dos puntos del espacio, esta se puede clasificar según la perceptibilidad en la diferencia de color según la Tabla 3.

Tabla 3. Perceptibilidad en la diferencia de color ( $\Delta E$ ) (López & Di Sarli, 2016)

| Percepción | Diferencia de color ( $\Delta E$ ) |
|------------|------------------------------------|
| No visible | $< 0,2$                            |
| Muy leve   | $0,2 - 0,5$                        |
| Leve       | $0,5 - 1,5$                        |
| Notable    | $1,5 - 3,0$                        |

|             |            |
|-------------|------------|
| Muy notable | 3,0 – 6,0  |
| Grande      | 6,0 – 12,0 |
| Muy grande  | > 12,0     |

---

#### 2.4.4. Actividad de agua

La actividad del agua se define como la razón entre la presión de vapor del agua en un alimento y la presión de vapor saturada del agua a la misma temperatura. Pero también, se puede definir como la disponibilidad de agua para microorganismos, reacciones enzimáticas y químicas; este parámetro es el más influyente en la determinación de la vida útil del producto.

Cuando su valor es igual a uno toda el agua se encuentra disponible, en cambio cuando su valor es cero no hay disponibilidad de agua. Casi toda la actividad microbiana se detiene bajo una actividad de agua de 0,6; mientras que el crecimiento de hongos se inhibe bajo una actividad de agua de 0,7 y las levaduras bajo 0,8. La interacción de la actividad del agua con el pH, temperatura, oxígeno, dióxido de carbono y preservantes químicos, es relevante para inhibir el crecimiento de microorganismo, estos tienen un rango de actividad del agua donde se produce su proliferación (Fellows, 2017).

#### 2.5. Capacidad de procesamiento y eficiencia energética

La capacidad energética se define según la Ecuación 8:

$$\eta = \frac{\text{Energía necesaria}}{\text{Energía consumida}} = \frac{\text{Potencia}_{\text{salida}} * t}{\text{Potencia}_{\text{entrada}} * t} \quad (8)$$

Donde:

- $P_i$  es la potencia de salida o entrada del microondas, (kW)
- $t$  es el tiempo, (h).

Mientras que la capacidad de procesamiento se define según la Ecuación 9:

$$\text{Capacidad de procesamiento} = \frac{\text{Masa}_{\text{manzana}}}{\text{Área de microondas}} \quad (9)$$

Se plantea como objetivo tener la mayor eficiencia posible debido a las limitaciones en el consumo energético, junto con una buena capacidad de procesamiento, ya que al procesar una mayor cantidad de alimentos con la misma energía se reduce el consumo de esta.

# Capítulo III

---

## Metodología

### 3. Metodología

En el presente trabajo se busca diseñar y mejorar mediante un secador hidro conductivo acoplado a microondas la deshidratación de láminas de manzana, evaluando su cinética de secado y analizando la calidad final del producto. Para lograr esto se proponen los siguientes experimentos; primero realizar un control mediante secado con ventana refractiva, en el cual se trabajará con el agua a 100 °C con un espesor de Mylar (película plástica), correspondiente a 0,3 (mm), se tiene como objetivo llegar a una humedad menor a 10% mediante la medición de la diferencia de masa.

Luego, se realiza el secado con ventana refractiva acoplado a microondas, en este se trabajará la ventana refractiva, inserta en el microondas, con el agua a 100 °C con un espesor de Mylar, correspondiente a 0,3 mm; mientras que el secado con microondas se trabajará en 2 potencias correspondientes a 1000 W y 700 W; al igual que el control el objetivo es llegar a una humedad menor a 10%.

#### 3.1. Determinación parámetros de operación

Asociado a los experimentos se tienen determinados parámetros de operación, los cuales son espesor de Mylar, potencia del microondas, temperatura del agua y tiempo de secado. Estos parámetros son obtenidos mediante pruebas experimentales preliminares. A continuación, se presenta el diseño experimental en la Tabla 4.

*Tabla 4. Diseño experimental*

| <b>Condiciones de Operación</b> | <b>Ventana Refractiva</b> | <b>Ventana Refractiva acoplado a microondas</b> |
|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------|
| Temperatura agua (°C)           | 100                       | 100                                             |
| Potencia Microondas (W)         | -                         | 700 -1000                                       |
| Espesor Mylar (mm)              | 0,3                       | 0,3                                             |

Adicionalmente, se tiene el tiempo en el cual el agua alcanza los 100 °C en el microondas, este parámetro se va a determinar mediante el calentamiento de 800 mL de agua en un recipiente de vidrio en el microondas a las diferentes potencias del experimento.

Inicialmente se realizan experimentos exploratorios en la ventana refractiva y en el microondas para determinar el tiempo de secado, el cual se determina cuando la humedad es menor a 10%; y poder determinar el tiempo de extracción de las muestras de manzanas, para obtener cinco puntos de medición para la curva de secado. También, se hacen experimentos para determinar la masa de las muestras en los cinco momentos de medición, esto para determinar la cantidad de muestras necesarias para determinar el contenido de humedad.

### 3.2. Caracterización y preparación materia prima

La materia prima corresponde a manzanas Granny Smith, las cuales son adquiridas en tiendas de Valparaíso, están son almacenadas en un refrigerador a 4 °C hasta su utilización.

Antes de utilizar las manzanas estas son lavadas, luego son cortadas en láminas de 3 mm de espesor y 40 mm de diámetro. Adicionalmente, se realiza un pretratamiento mediante escaldado con el objetivo de realizar una inactivación enzimática para conservar las propiedades de la manzana, esta técnica consiste en introducir las láminas de manzana por un minuto en agua destilada a 90 °C y luego un minuto en agua destilada a 4 °C. Finalmente, las láminas de manzana se dejan secando sobre papel absorbente y luego se pesan en una balanza analítica para su posterior empleo en los experimentos (Karim, y otros, 2023).

### 3.3. Secado con ventana refractiva (VR)

El secado con ventana refractiva se realiza en un baño termorregulado, Memmert Modelo WNB45, el cual inicialmente se llena con agua destilada y luego se calienta hasta 100°C. Posteriormente, se coloca sobre el agua un recipiente de Mylar de dimensiones 59 x 35 cm, correspondiente a toda el área disponible en el baño termorregulado.

Luego, se disponen sobre el Mylar las láminas de manzanas preparadas previamente, estas se dejan secando sin girarse durante la duración de los experimentos. Cada 12 minutos se extraen muestras de manzana y se mide su masa en una balanza analítica, para obtener de esta forma la curva de secado del experimento; se detienen las mediciones cuando la humedad es menor a 10%. Adicionalmente, se mide la temperatura del agua y de la manzana mediante termocuplas. A continuación, se presenta en la Figura 9 el sistema.

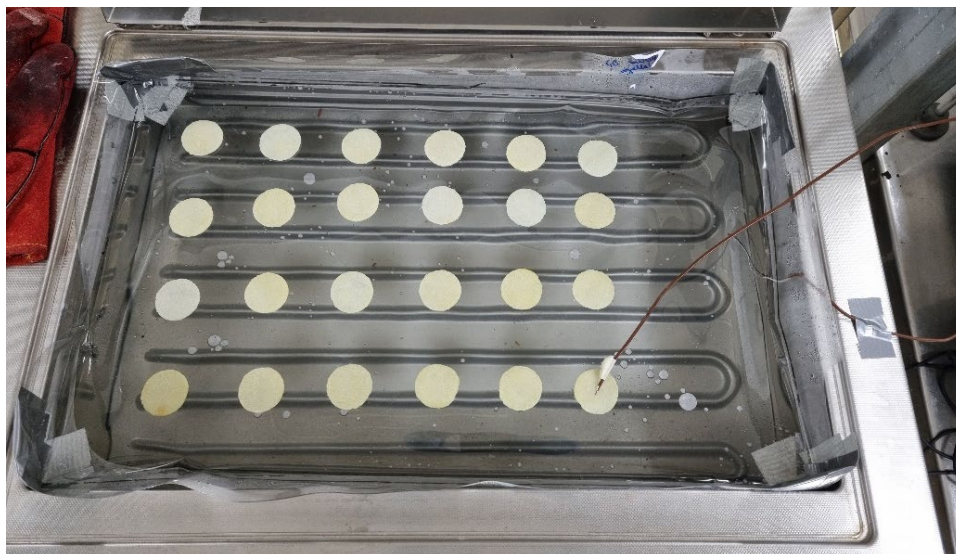


*Figura 9. Ventana refractiva utilizada en laboratorio*

### 3.4. Secado con ventana refractiva acoplado a microondas (VR+MW)

El secado con ventana refractiva acoplado a microondas se realiza mediante la inserción de un recipiente de vidrio repleto de agua destilada, con un recipiente de Mylar sobre su superficie correspondiente a la ventana refractiva, en el microondas; adicionalmente se mide la temperatura del agua y de la mazana mediante fibra óptica. En la Figura 10 se presenta todo el sistema, el cual consiste en un horno microondas comercial 1000 W modelo WA70002SLA, fibras ópticas recubiertas de poliamida de la marca Technica, sistema de extracción de aire Nagashi modelo DP200A (Ver Anexo 1) y un interrogador modelo Luna's HYPERION si155 para la transmisión de las fibras ópticas al computador.



Figura 10. Sistema de secado hidroconectivo acoplado a microondas en laboratorio

Inicialmente, se llena el recipiente de vidrio con 800 mL de agua destilada, luego se coloca un recipiente de Mylar en contacto con el agua, el cual tiene una distancia de 1 cm hasta el borde del recipiente de vidrio. Luego, se disponen sobre el Mylar las láminas de manzanas preparadas previamente, las cuales se dejan sin girar durante la duración de los experimentos.

Este sistema se introduce dentro del microondas, donde se trabaja cambiando la potencia a 700 W y 1000 W para un Mylar de 0,3 mm de espesor, obteniéndose así dos experimentos. A continuación, se presenta en la Figura 11 el sistema de ventana refractiva al interior del microondas.

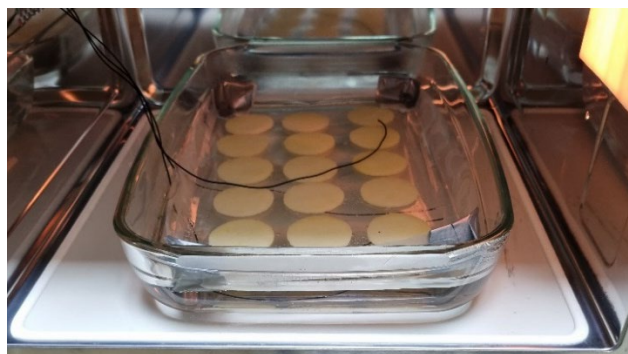


Figura 11. Ventana refractiva al interior del microondas

Durante la extensión de los experimentos, se extraen muestras de manzanas cada 4 minutos para la potencia de 1000 W y 7 minutos para la potencia de 700 W, luego se mide su masa en una balanza analítica, para obtener de esta forma la curva de secado del experimento; se detienen las mediciones cuando la humedad es menor a 10%.

Puesto que se trabaja con radiación electromagnética se mide la radiación proveniente del equipo mediante un Medidor de Radiación Electromagnética Tenmars TM-195, se obtienen valores variables para cada operación de secado que van desde 1,358 hasta 19,231 V/m para la radiación en diversos puntos alrededor del microondas; estos valores se encuentran dentro del límite de radiación correspondiente a  $5 \text{ mW/cm}^2$ , equivalente a 137 V/m aproximadamente (Occupational Safety and Health Standards, 2013). En la Figura 12 se puede ver el equipo.



Figura 12. Medidor de Radiación Electromagnética Tenmars Tm195

### 3.5. Perfil de temperatura

Para estudiar el perfil de temperatura del proceso de secado se utilizan fibra óptica y termocuplas, las cual se sitúan en al agua y el centro de la muestra de manzana, de esta manera se recopilan los datos de temperatura de estos puntos de forma continua. Se estudia el perfil para el experimento de control y los dos experimentos de secado con ventana refractiva acoplado a microondas.

En el caso de las termocuplas tipo T se utiliza el software OMEGA T-08 para obtener los datos en el computador, los cuales son transmitidos mediante una unidad de adquisición de datos de termocupla OMEGA Engineering TC-08 (Figura 13).



Figura 13. OMEGA Engineering TC-08

En el caso de las fibras ópticas recubiertas de poliamida de la marca Technica, se utiliza el software ENLIGHT para obtener los datos en el computador, los cuales son transmitidos mediante un interrogador Luna's HYPERION si155 (Figura 14).



*Figura 14. Interrogador Luna's HYPERION si155*

### 3.6. Actividad del agua

La actividad del agua se obtiene para la materia prima y la última muestra extraída de cada uno de los experimentos, esta se determina mediante un higrómetro de punto de rocío, modelo Rotronic hygropalm HP21, ver en Figura 15.



*Figura 15. Rotronic hygropalm HP21*

Se mide la actividad del agua para 3 muestras de manzana seca en duplicado para cada experimento.

### 3.7. Contenido de humedad

La humedad de las muestras de manzana se determina a través de la norma 934.06 de la AOAC (Association of Official Analytical Chemists) (AOAC, 1996). El procedimiento es el siguiente:

1. Pesar una placa Petri en una balanza analítica.
2. Agregar entre 5 a 10 gramos de muestra a la placa Petri, luego pesar la muestra junto con la placa en una balanza analítica.
3. Introducir la muestra junto con la placa en un desecador, llevar la presión al interior del desecador a 100 mm Hg o menos mediante una bomba de vacío modelo Rocker 811.

4. Colocar el desecador en una estufa Memmert modelo 800 a 60 °C por un período de 24 horas o hasta que la masa sea constante.

Luego, el cálculo de la humedad se obtiene a partir de la Ecuación 10 y 11.

$$H_{bh} = \frac{m_i - m_f}{m_i - m_p} \quad (10) \quad H_{bh} = \frac{m_i - m_f}{m_i - m_p} \quad (11)$$

Donde:

- $H_{bh}$  es la humedad en base húmeda, (g agua/g muestra).
- $H_{bs}$  es la humedad en base seca, (g agua/g muestra seca).
- $M_i$  es masa de la placa más la masa inicial de la muestra, (g).
- $M_f$  es masa de la placa más la masa final de la muestra al sacarla de la estufa, (g).
- $M_p$  es la masa de la placa Petri, (g).

La determinación del contenido de humedad se realiza para la materia prima y cinco puntos por experimento. En la Figura 16 se tiene un desecador con las muestras de manzana en su interior.



*Figura 16. Desecador con muestras de manzana en su interior*

### 3.8. Calidad producto final

#### 3.8.1. Contenido total de polifenoles

El contenido total de polifenoles se determinará con el método de Folin-Ciocalteu (Anggraini, Febrianti, Aisman, & Didi Ismanto, 2016).

En primer lugar, se construye una curva estándar de calibración con el propósito de obtener el resultado como concentración de ácido gálico equivalente, esta se hace en duplicado; para esto se prepara en tubos de ensayos una solución con 3,75 mL de agua destilada, 0,25 mL de reactivo Folin-Ciocalteu al 50% v/v con agua destilada y 0,5 mL de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 10% con agua

A photograph of a Spectronic GENESYS 5 spectrophotometer. The device is a dark grey, boxy instrument with a control panel on the left side. The panel includes a small monochrome LCD screen, a numeric keypad with function keys like 'ZERO', 'ONE', 'TWO', 'THREE', 'FOUR', 'FIVE', 'SIX', 'SEVEN', 'EIGHT', 'NINE', 'ENTER', 'CLEAR', 'MODE', 'UTILITY', and 'HELP'. Above the screen are two blue arrow buttons. Below the keypad are two sample holder slots labeled 'A' and 'B'. The top of the instrument has a large rectangular opening for the sample compartment. The device is sitting on a light-colored, textured surface.

Las soluciones de ácido gálico se preparan a partir de una solución madre de concentración de 1 g/L de ácido gálico, donde se tiene 0,1 g de ácido gálico y 100 mL de metanol al 80% v/v, esta solución se diluye a las concentraciones de trabajo. Lo anterior se realiza mediante el agregado de 0,2 a 1,2 mL de la solución madre a matraces de 10 mL, en donde se aforan con metanol al 80% v/v hasta llegar a los 10 mL.

- Se prepara un extracto metanólico con 2 gramos de muestra, las cuales son elegidas al azar, y 20 mL de metanol al 80% v/v, se homogeniza y se guarda en un lugar oscuro cubierto con papel aluminio durante 60 minutos, luego se filtra el sobredenante y se guarda a temperatura ambiente hasta su uso en un recipiente cubierto de aluminio.
- Se diluye 1 mL de extracto metanólico en agua destilada en razón 1:10.
- En un tubo de ensayo se agregan 0,5 mL del extracto diluido, 3,75 mL de agua destilada, 0,25 mL de reactivo Folin-Ciocalteu al 50% v/v y 0,5 mL de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 10%, los cuales se mezclan hasta homogenizar, esto se realiza en triplicado.
- El tubo de ensayo se guarda en un lugar oscuro cubierto con papel aluminio durante 60 minutos, luego se agita y se deposita en celdas plásticas.
- Las celdas plásticas se ingresan al espectrofotómetro para medir la absorbancia con una longitud de onda de 765 nm.

Luego, se tiene que el contenido de polifenoles totales en las muestras corresponde a la Ecuación 12.

$$PFT = f(ABS) * \frac{1 (L)}{1000 (mL)} * \frac{V_e}{M_e} * \frac{1}{1 - H} * F_D \quad (12)$$

Donde:

- *PFT* es la concentración de polifenoles totales, (mg GAE/g base seca)
- *f(ABS)* es la concentración de ácido gálico equivalente obtenida de la curva de calibración, (mg GAE/L).
- *V<sub>e</sub>* es el volumen de metanol 80% v/v utilizado en el extracto metanólico, (mL).
- *M<sub>e</sub>* es la masa de muestra utilizada en el extracto metanólico, (g).
- *H* la fracción de humedad de la muestra.
- *F<sub>D</sub>* es el factor de dilución del extracto metanólico.

### 3.8.2. Capacidad antioxidante

La capacidad antioxidante se determina con el método DPPH (Mey Chuah, y otros, 2008).

En primer lugar, se construye una curva estándar de calibración de Trolox equivalente, esta se realiza en duplicado.; para esto se prepara en tubos de ensayos una solución con 2,5 mL de DPPH y 0,5 mL de solución patrón de Trolox a una concentración de 0,1 mM, la cual se homogeniza mediante agitación; luego , se guardan los tubos de ensayo en un lugar oscuro cubierto con papel aluminio durante 30 minutos, luego se vuelve a agitar la solución y se mide su absorbancia mediante un espectrofotómetro marca SPECTRONIC ® GENESIS <sup>TM</sup> 5 a 517 nm.

La solución de DPPH se prepara con 0,0078844 g de DPPH en 200 mL de metanol puro, mientras que la solución de Trolox se prepara con 20,0232 mg de Trolox en 80 mL de metanol al 80% v/v, la cual se diluye en matraces aforados a concentraciones de 0, 50, 100 y 200 mg/L, esto se realiza mediante el agregado de 0,5 a 2,0 mL de la solución madre a matraces de 10 mL, en donde se aforan con metanol al 80% v/v hasta llegar a los 10 mL, posteriormente se agitan estas soluciones.

Para el análisis de la capacidad antioxidante se sigue el siguiente procedimiento:

- Se prepara un extracto metanólico con 2 gramos de muestra, las cuales son elegidas al azar, y 20 mL de metanol al 80%, se homogeniza y se guarda en un lugar oscuro cubierto con papel aluminio durante 60 minutos, finalmente se filtra el sobredrenante y se guarda a temperatura ambiente hasta su uso.
- Se diluye 1 ml de extracto metanólico en agua destilada en razón 1:100.
- En un tubo de ensayo, se agregan 0,5 mL del extracto diluido y 2,5 mL de DPPH a una concentración de 0,1 mM en metanol puro, los cuales se mezclan hasta homogenizar, esto se realiza en triplicado.

- El tubo de ensayo se guarda en un lugar oscuro cubierto con papel aluminio durante 30 minutos, luego se agita y se deposita en celdas plásticas.
- Se mide la absorbancia con un espectrofotómetro con una longitud de onda de 517 nm.

Luego, se tiene que la actividad antioxidante en las muestras corresponde a la Ecuación 13.

$$CA = g(ABS) * \frac{1 (L)}{1000 (mL)} * \frac{V_e}{M_e} * \frac{1}{1 - H} * F_D \quad (13)$$

Donde:

- $CA$  es la concentración de polifenoles totales, (mg TE/g base seca).
- $g(ABS)$  es la concentración de Trolox equivalente obtenida de la curva de calibración, (mg TE/L).
- $V_e$  es el volumen de metanol 80% v/v utilizado en el extracto metanólico, (mL).
- $M_e$  es la masa de muestra utilizada en el extracto metanólico, (g).
- $H$  la fracción de humedad de la muestra.
- $F_D$  es el factor de dilución del extracto metanólico.

### 3.8.3. Determinación de color

Para determinar el color se utiliza un colorímetro Minolta CR-400/410 (Ver Figura 18), a partir del cual se obtienen los parámetros de la escala de color de Hunter, correspondientes a  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , los cuales representan la luminosidad, tonalidad rojo/verde y tonalidad azul/amarillo, respectivamente. Antes de realizar las mediciones de color se calibra el instrumento con un placa blanca que viene incluida en el set del equipo.

El cambio del color queda determinado a partir de la Ecuación 14.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_i^*)^2 + (a_0^* - a_i^*)^2 + (b_0^* - b_i^*)^2} \quad (14)$$

Se tiene que  $L_0^*$ ,  $a_0^*$ ,  $b_0^*$  corresponden a los parámetros de la escala de Hunter de una muestra inicial, mientras que  $L_i^*$ ,  $a_i^*$ ,  $b_i^*$  corresponden a los parámetros de la escala de Hunter para el momento en el cual se quiera determinar el cambio en el color total de la muestra (Vega-Gálvez & et. al, 2012). Se mide el color para la materia prima, para utilizarlo como muestra de referencia, y para 3 muestras de manzana seca en duplicado para cada experimento.



Figura 18. Colorímetro Minolta CR-400/410

### 3.9. Análisis estadístico

Para el análisis estadístico de los datos experimentales obtenidos, se utiliza el software STATGRAPHICS Centurion XVI, a partir de este se realizan análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de múltiples rangos de Duncan, con el objetivo de determinar la existencia de diferencias significativas entre los resultados con un 95% de confianza.

# Capítulo IV

---

## Resultados y Discusión

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Determinación de tiempos de secado

Para determinar el tiempo de secado se estableció como criterio que humedad en base húmeda sea menor a 10%, puesto que con este valor la actividad del agua debería ser menor a 0,4; valor en el que no debería existir crecimiento de microorganismos producto de la baja disponibilidad de agua.

A continuación, se muestra cómo cambia la humedad en el tiempo (Figura 19) para secado en ventana refractiva (VR), secado con ventana refractiva acoplado a microondas a 700 Watts de potencia (VR+MW 700W) y secado con ventana refractiva acoplado a microondas a 1000 Watts de potencia (VR+MW 1000W).

Cabe destacar que solo se considera el tiempo de secado, es decir, no se incluye el tiempo de preparación de muestras.

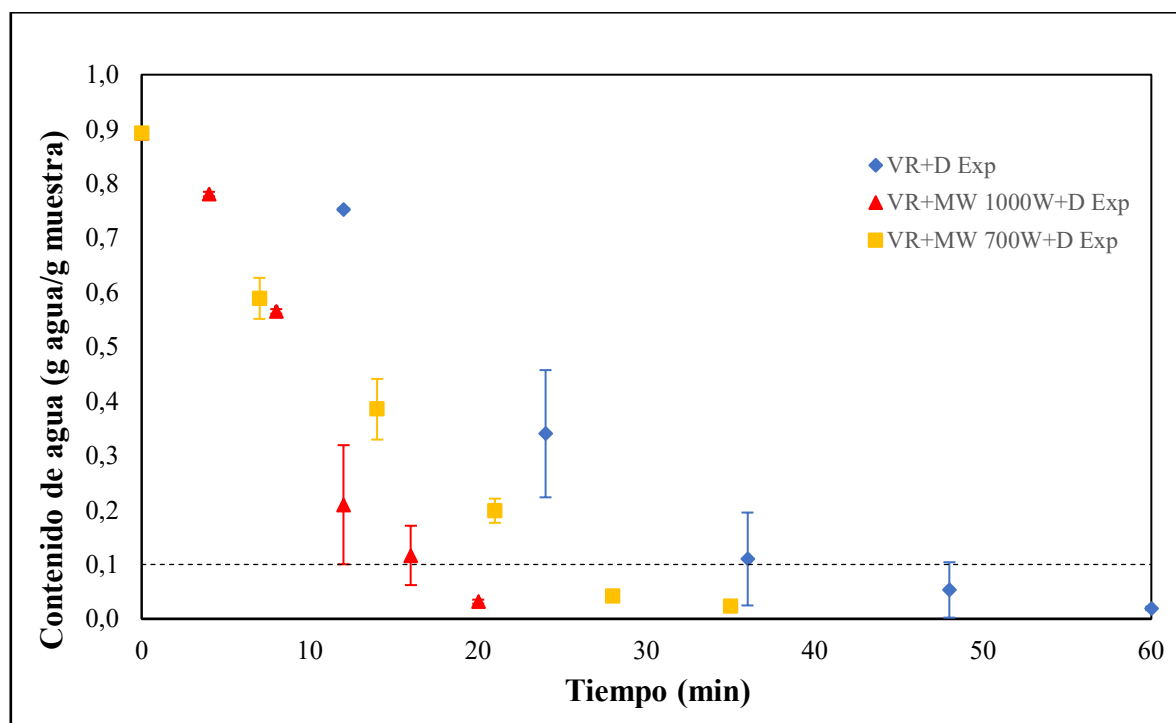


Figura 19. Contenido de agua en el tiempo

Se puede observar una disminución significativa en el tiempo de secado entre el secado en ventana refractiva y el secado con microondas, también se observa un cambio entre las distintas potencias del microondas. En el caso del secado en ventana refractiva se obtiene un tiempo de 60 minutos, mientras que para el secado con microondas a 700 W se obtiene un tiempo de 35 minutos y para 1000 W se obtiene un tiempo de 20 minutos; en comparación al control el tiempo de secado en microondas se reduce en un 42% y en un 67%, respectivamente. En la Tabla 5 se tiene un resumen de los resultados.

Tabla 5. Tiempo de secado de experimentos

| Método de secado | Tiempo (min) | Reducción de tiempo ( $\Delta\%$ ) |
|------------------|--------------|------------------------------------|
| VR               | 60           | Ref.                               |
| VR+MW 700W       | 35           | 42                                 |
| VR+MW 1000W      | 20           | 67                                 |

Lo anterior indica que la potencia del microondas es una variable significativa en la determinación del tiempo de secado y que incorporar el microondas al secado efectivamente reduce el tiempo de operación, lo cual se encuentra dentro de lo esperado según la literatura, puesto que en un estudio realizado para láminas de manzanas con un secado con microondas asistido con aire caliente se obtuvo el producto deshidratado cuatro veces más rápido en comparación a los métodos tradicionales convectivos de secado (Kumar, Joardder, Farrell, Millar, & Karim, 2016).

#### 4.2. Curvas de secado

Una vez establecidos los tiempos de secado, se utiliza la metodología descrita previamente para obtener la humedad de la materia prima (MP), el producto final y cuatros puntos intermedios de secado. Luego, a partir de los datos experimentales obtenidos se calcula el contenido de humedad adimensional (MR) para cada punto.

Se utiliza el software MATLAB para modelar el contenido de humedad adimensional de cada experimento según la segunda ley de Fick (Ver Figura 20), el modelo anómalo (Ver Figura 21) y el modelo anómalo manteniendo constante el  $\alpha$  (Ver Figura 22). A continuación, se presentan las curvas con los ajustes obtenidos.

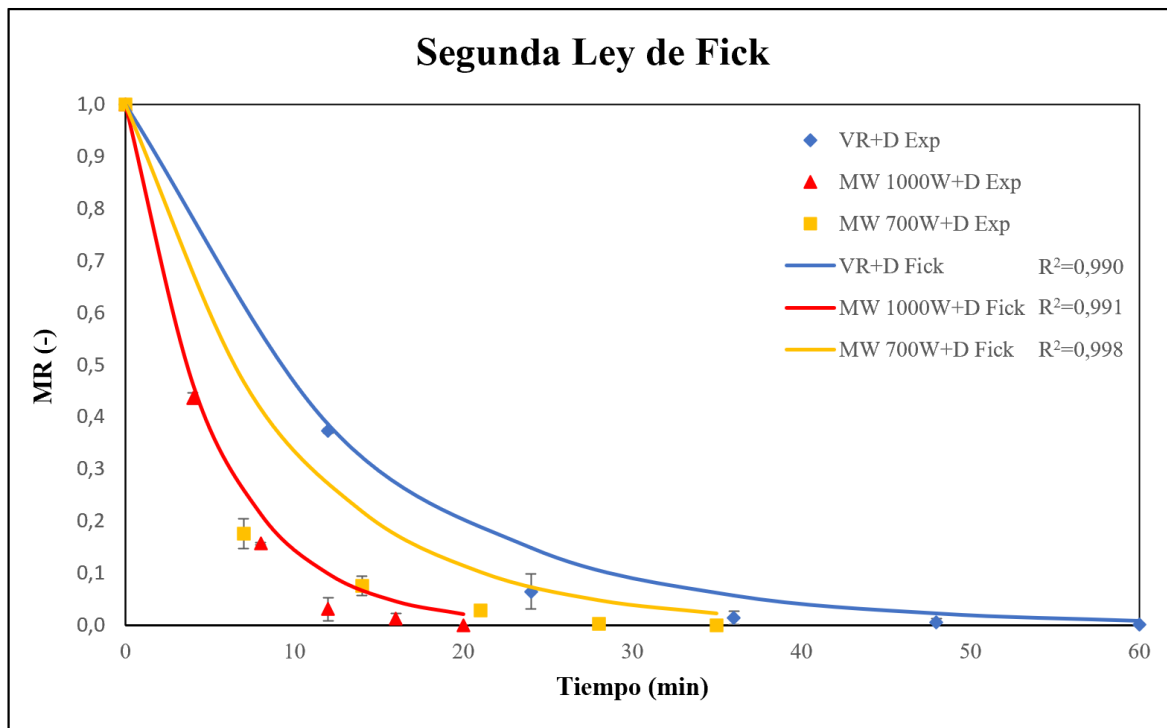


Figura 20. Curva de secado experimental y teórica para segunda ley de Fick

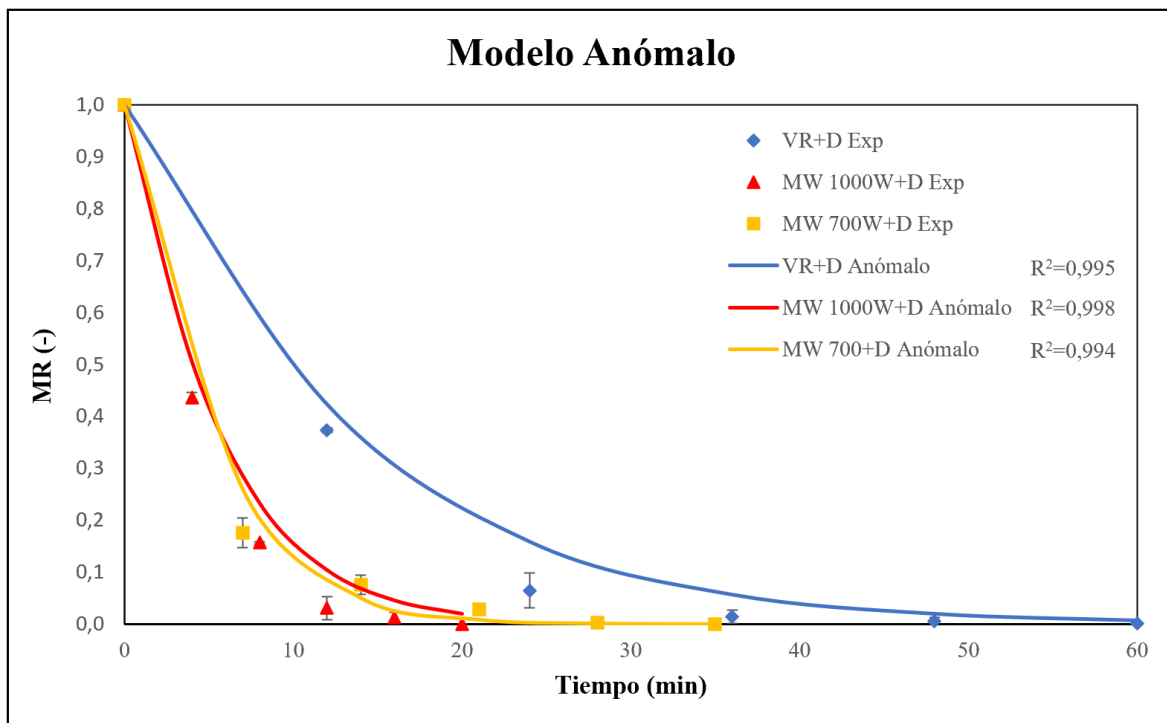


Figura 21. Curva de secado experimental y teórica para modelo anómalo

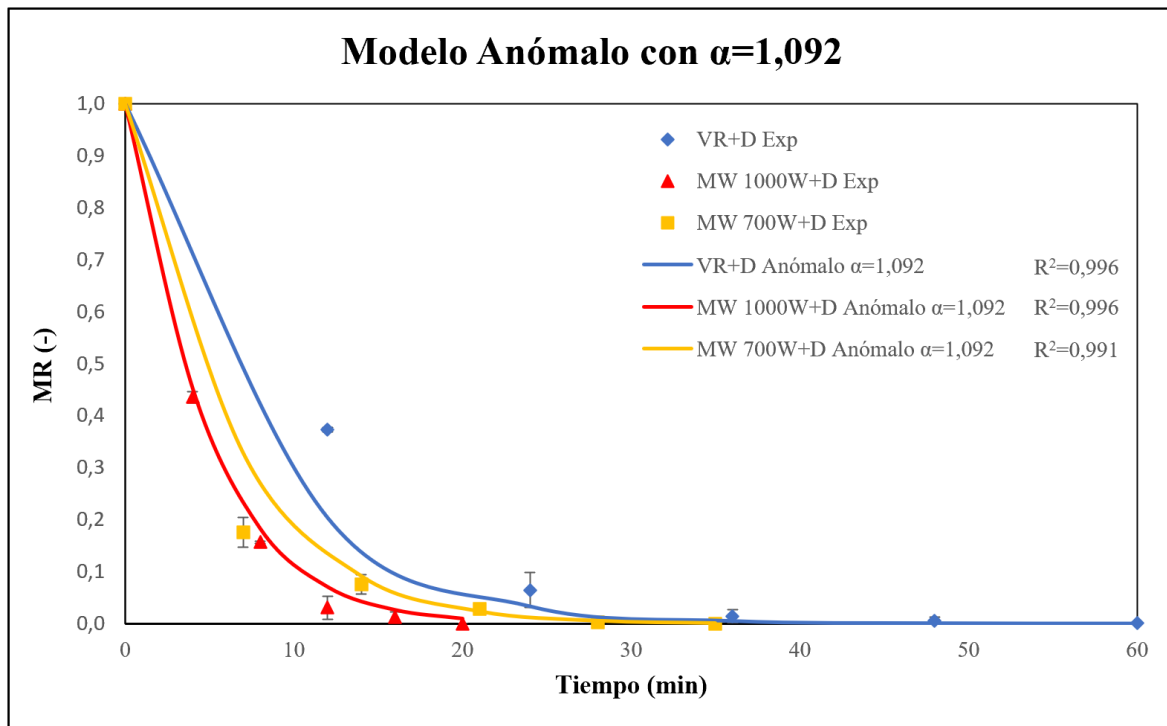


Figura 22. Curva de secado experimental y teórica para modelo anómalo con  $\alpha=1,092$

Se puede observar en las curvas que la velocidad de secado es mayor en el secado con microondas en comparación a ventana refractiva, al igual que el caso anterior; también que al aumentar la potencia aumenta la velocidad de secado.

Además, se observa que al comienza hay una caída pronunciada de la humedad debido a que se está evaporando el agua superficial, por lo que, la pérdida de agua es más veloz en este periodo; luego al final se puede observar un comportamiento constante donde se alcanza la humedad de equilibrio.

Algunos aspectos para considerar en el análisis de las curvas de secado son las condiciones iniciales de las muestras, las cuales pueden variar en sus dimensiones y masa, por lo que, las muestras empleadas en los experimentos tienen diferentes masas, lo cual puede causar las diferencias en los contenidos de humedad de los puntos asociados a los errores.

#### 4.3. Determinación coeficiente de difusividad

La determinación del coeficiente de difusividad efectivo se realiza mediante el ajuste de la segunda ley de Fick y el modelo de difusión anómala a los contenidos de humedad adimensional obtenidos en cada experimento a través del software MATLAB. En la Tabla 6 y 7 se presentan los coeficientes obtenidos, junto con sus coeficientes de determinación ( $R^2$ ) y raíces del error cuadrático medio (SEE). Además, para el modelo de difusión anómala se presenta el valor del parámetro  $\alpha$ , primero para cada método de secado y luego un valor promedio, puesto que el parámetro solo depende del material alimenticio, el cual corresponde a manzana para todos los experimentos.

Tabla 6. Coeficiente de difusividad efectivo según segunda ley de Fick por experimento

| Método de Secado | $D_{\text{eff}} (\times 10^9 \text{ m}^2/\text{s})$ | $R^2$ ajustado | SEE   |
|------------------|-----------------------------------------------------|----------------|-------|
| VR               | $1,03 \pm 0,43^a$                                   | 0,968          | 0,006 |
| VR+MW 1000W      | $2,35 \pm 0,61^{b,c}$                               | 0,983          | 0,004 |
| VR+MW 700W       | $2,26 \pm 0,44^{b,c}$                               | 0,995          | 0,001 |
| VR + D           | $1,21 \pm 0,31^a$                                   | 0,990          | 0,002 |
| VR+MW 1000W + D  | $2,93 \pm 0,63^c$                                   | 0,991          | 0,003 |
| VR+MW 700W + D   | $1,65 \pm 0,45^{a,b}$                               | 0,998          | 0,029 |

Tabla 7. Coeficiente de difusividad efectivo según modelo de difusión anómalo por experimento

| Método de Secado | $D_{\text{eff}} (\times 10^{10} \text{ m}^2/\text{s})$ | $R^2$ ajustado | $\alpha$ | SEE   | $\alpha$ Promedio | $D_{\text{eff}} (\times 10^{10} \text{ m}^2/\text{s})$ | $R^2$ ajustado | SEE   |
|------------------|--------------------------------------------------------|----------------|----------|-------|-------------------|--------------------------------------------------------|----------------|-------|
| VR               | $3,4 \pm 1^a$                                          | 0,982          | 1,146    | 0,006 | 1,099             | $6,6 \pm 1,6^a$                                        | 0,980          | 0,004 |
| VR+MW 1000W      | $26,6 \pm 0,01^c$                                      | 0,997          | 1,050    | 0,006 | 1,099             | $12,8 \pm 1,8^b$                                       | 0,994          | 0,003 |
| VR+MW 700W       | $15 \pm 2,3^b$                                         | 0,996          | 1,056    | 0,002 | 1,099             | $11,4 \pm 1,7^b$                                       | 0,996          | 0,002 |
| VR + D           | $5,7 \pm 0,9^a$                                        | 0,995          | 1,099    | 0,003 | 1,099             | $10,5 \pm 1,9^b$                                       | 0,996          | 0,007 |
| VR+MW 1000W + D  | $15,7 \pm 1,4^b$                                       | 0,998          | 1,092    | 0,004 | 1,099             | $17,5 \pm 1,7^c$                                       | 0,996          | 0,001 |
| VR+MW 700W + D   | $11,7 \pm 3,9^b$                                       | 0,994          | 1,151    | 0,002 | 1,099             | $13,3 \pm 2,2^b$                                       | 0,991          | 0,006 |

\*Letras diferentes indican diferencias significativas entre mediciones ( $p > 0,05$ ).

Respecto a los coeficientes de difusividad efectivos, se puede observar que los valores obtenidos para cada uno de los experimentos en el caso de la segunda ley de Fick presentan diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ) entre los experimentos de ventana refractiva y acoplados a microondas, además, se observa un comportamiento similar en el caso del modelo de difusión anómalo.

Se presentan los valores obtenidos para los contenidos de humedad sin emplear la norma 934.06 de la AOAC y empleando la norma, valores con “+D” en su nombre. En el caso de la segunda ley de Fick y el modelo anómalo, los  $R^2$  ajustados son menores y los SEE son mayores para los experimentos con contenidos de humedad sin norma, esto significa que hay un mayor nivel de error en la obtención del MR, por ende, en el ajuste de curvas, puesto que no es la humedad real de las muestras la que se utiliza en los ajustes.

Al observar los resultados obtenidos de  $R^2$  ajustados para los contenidos de humedad empleando la norma se tiene que los valores son mayores para el modelo anómalo, aunque la diferencia es de milésimas, en comparación a los valores para la segunda ley de Fick, lo cual implica un mejor ajuste de la curva. Mientras que los valores de SEE son menores para el modelo anómalo en comparación a segunda ley de Fick, confirmando que existe un mejor ajuste para este modelo.

A pesar de que el modelo de difusión anómalo presenta un mejor ajuste, la segunda ley de Fick también modela de manera adecuada el comportamiento de la cinética de secado, esto debido a que el valor del parámetro  $\alpha$  es cercano a uno, lo que implica un comportamiento difusivo, adecuándose esto a lo propuesto por la segunda ley de Fick.

En lo que respecta a los valores del coeficiente de difusión efectivo se tiene que estos están en el orden de magnitud de  $10^{-10}$  y  $10^{-9}$ , valores dentro de lo típico para alimentos deshidratados, correspondientes a valores entre  $10^{-12}$  y  $10^{-7}$  (Corzo, 2011) y también comparables al de estudios realizados en manzanas a  $95^{\circ}\text{C}$ , en los cuales se obtiene el mismo orden de magnitud (Franco & et. al, 2019).

En el caso del parámetro  $\alpha$  se tiene que los valores se encuentran dentro de un rango de 1,050 a 1,151, por lo tanto, el comportamiento de los procesos es súperdifusivo para los experimentos, estos valores son comparables con los obtenidos en estudios con características similares (Franco & et. al, 2019).

Al comparar los valores del coeficiente de difusión efectivo para las distintas potencias de microondas, se obtiene que al aumentar la potencia el coeficiente es mayor, lo cual indica que la difusión del agua ocurre más rápido, resultado que se condice con los tiempos de secado obtenidos, donde un incremento en la potencia implica un menor tiempo de secado; puesto que el aumento de la temperatura, producido por la energía de la radiación electromagnética, genera un incremento en la actividad de las moléculas del agua resultando en una mayor difusividad. Esta tendencia en el comportamiento del coeficiente de difusión efectivo ha sido reportada en diversos estudios que emplean microondas (Zarein, Samadi, & Ghobadian, 2015).

A partir del parámetro  $\alpha$  promedio se recalculan los coeficientes de difusión efectiva, los resultados de este ajuste no muestran diferencia significativa con los valores originales de los  $R^2$  ajustados y SEE, obteniéndose valores cercanos a uno para el primero y valores cercanos a cero para el segundo, implicando un buen ajuste del modelo; lo anterior se debe a que el coeficiente de difusión efectivo depende de la temperatura, la cual es similar para todos los experimentos realizados.

En el Anexo 2 se presentan las curvas de secado para los experimentos con los contenidos de humedad obtenidos sin emplear la norma 934.06 de la AOAC.

## 4.4.Comparación de parámetros de calidad

### 4.4.1. Contenido de polifenoles totales

A continuación, se presenta en la Figura 23 el contenido de polifenoles totales de la materia prima y el producto final de cada método de secado, en el Anexo 3 se presenta la curva de calibración de ácido gálico equivalente.

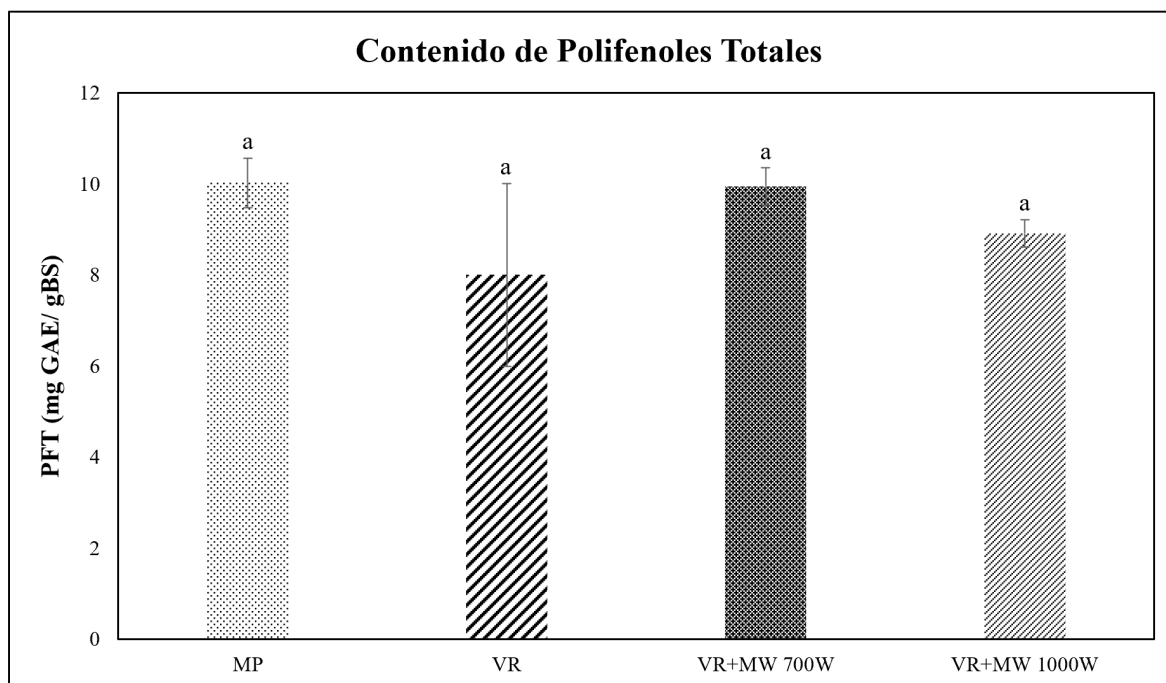


Figura 23. Contenido de polifenoles totales por experimento

\*Letras diferentes indican diferencias significativas entre mediciones ( $p > 0,05$ ).

Respecto al contenido de polifenoles totales, se puede observar que los valores obtenidos para la materia prima y cada uno de los experimentos no presentan diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0,05$ ).

Se obtiene que para la materia prima el contenido total de polifenoles es  $10,023 \pm 0,548$  (mg GAE/gbs), mientras que para el control en ventana refractiva es  $8,006 \pm 2,007$  (mg GAE/gbs), para secado en microondas a 700 W es  $9,950 \pm 0,412$  (mg GAE/gbs) y para el secado en microondas a 1000 W es  $8,914 \pm 0,306$  (mg GAE/gbs).

Al comparar los valores de las manzanas deshidratadas con la materia prima se tiene una reducción en un 20% para ventana refractiva, 1% para microondas a 700 W y 11% para microondas a 1000 W en el contenido total de polifenoles, lo anterior se debe a que la estructura de los polifenoles se degrada con facilidad al ser expuesta a calor.

Luego, se tiene que el secado con microondas conserva mejor el contenido de polifenoles en comparación al secado con ventana refractiva, esto debido a que al añadir el efecto de la radiación electromagnética aumenta la velocidad de secado, por lo que, las muestras de

manzana se exponen menos tiempo a una temperatura elevada, reduciendo el efecto de degradación. Diversos estudios han reportado este mismo comportamiento al comparar el contenido de polifenoles de sistemas híbridos que emplean microondas con métodos tradicionales convectivos (Zhang, Jiang, & Lim, 2010).

En estudios con ventana refractiva se ha reportado una disminución de polifenoles totales de 25% para una temperatura de 95°C (Quitral, 2014), valor comparable al obtenido en este trabajo. En el caso de secado con microondas no se tienen datos para manzana, existen estudios donde se utiliza un secado híbrido mediante microondas y aire caliente, en estos se reportan valores entre 0,53 a 1,55 (mg GAE/gbs), por lo que, los resultados de este trabajo indican una mejora significativa en comparación al uso de microondas con otras tecnologías (Musielak, Mieszczakowska-Frac, & Mierzwa, 2024). Para la materia prima se ha reportado un valor de  $11,22 \pm 0,47$  (mg GAE/gbs), el cual es similar al obtenido en este trabajo (Nuñez, y otros, 2024).

Se puede observar que la potencia tiene efecto en el contenido de polifenoles, en el caso de este trabajo, a menor potencia se degradan en menor cantidad los polifenoles. Según lo reportado por (Horuz, Bozkurt, Karataş, & Maskan, 2017), en un estudio de secado en microondas con aire caliente de cerezas el contenido de polifenoles tiende a aumentar al incrementar la potencia del microondas, las cuales corresponden a 120 W, 150 W y 180 W; esta tendencia también fue reportada por (Priecina, Karklina, & Kince, 2018) en el secado de apio con microondas y por (Kubra & Jagan Mohan Rao, 2012) en el secado de jengibre con microondas con potencias entre 385 y 800 W. La diferencia entre esta tendencia y los resultados obtenidos en los experimentos podría ser causada por la diferencia significativa entre las potencias utilizadas en los experimentos, las condiciones experimentales y el tipo de alimento utilizado.

A pesar de lo anterior, existen otros estudios donde el contenido de polifenoles disminuye a potencias de trabajo altas, (Zeng, Wang, Lv, & Wu, 2023) reporta que inicialmente en potencias bajas existe un incremento de polifenoles, pero a potencias altas disminuyen los polifenoles; este comportamiento también es reportado por (Xu & et. al, 2020) en el secado de repollo con microondas al vacío.

Debido a estas diferencias en los estudios, se puede concluir que el contenido de polifenoles totales depende del tipo de alimento, origen del alimento, tipo de ensayo utilizado, tipos de polifenoles presentes en las células y magnitud de la potencia, esto último se debe a que el calor generado por la radiación electromagnética de los microondas es intenso y veloz, lo cual podría resultar en la degradación térmica de los polifenoles (Lim & Murtijaya, 2007).

#### 4.4.2. Capacidad antioxidante

A continuación, se presenta en la Figura 24 la capacidad antioxidante de la materia prima y el producto final de cada método de secado, en el Anexo 4 se presenta la curva de calibración de Trolox equivalente.

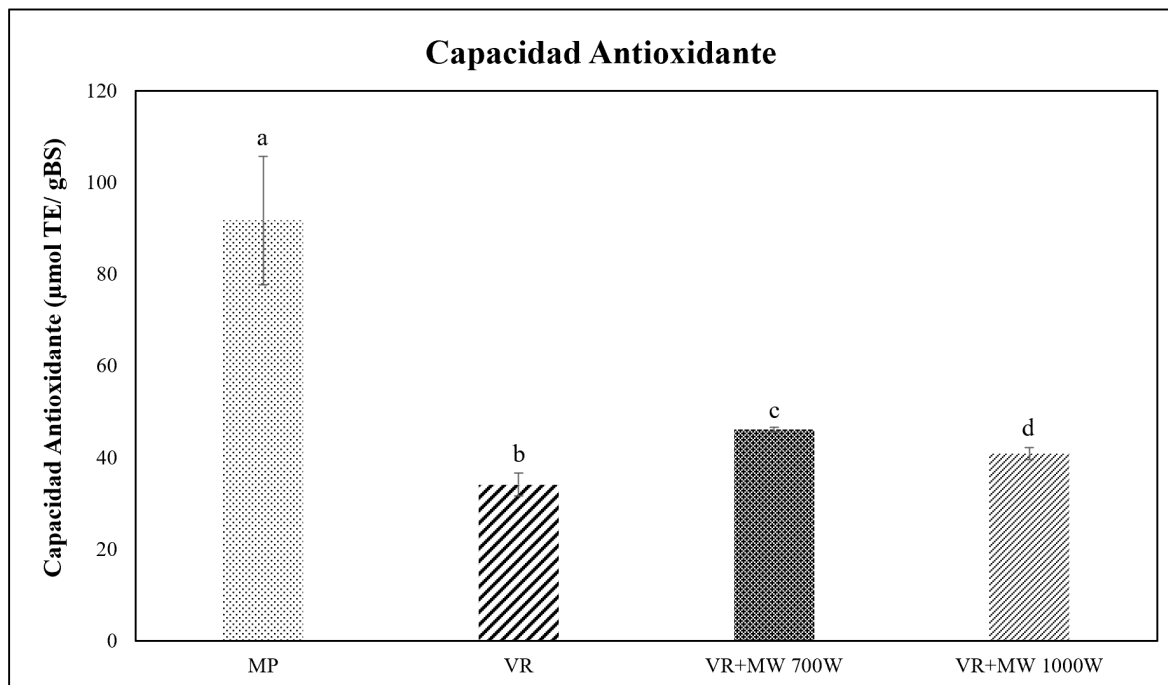


Figura 24. Capacidad Antioxidante por experimento

\*Letras diferentes indican diferencias significativas entre mediciones ( $p > 0,05$ ).

Respecto a la capacidad antioxidante, se puede observar que los valores obtenidos para la materia prima y cada uno de los experimentos presentan diferencias estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ).

Se obtiene que para la materia prima la capacidad antioxidante es  $91,678 \pm 14,023$  ( $\mu\text{mol TE/gbs}$ ), mientras que para el control en ventana refractiva es  $34,118 \pm 2,2556$  ( $\mu\text{mol TE/gbs}$ ) para secado en microondas a 700 W es  $46,117 \pm 0,458$  ( $\mu\text{mol TE/gbs}$ ) y para el secado en microondas a 1000 W es  $40,842 \pm 1,305$  ( $\mu\text{mol TE/gbs}$ ).

Al comparar los valores de las manzanas deshidratadas con la materia prima se tiene una reducción en un 63% para ventana refractiva, 50% para microondas a 700 W y 55% para microondas a 1000 W en la capacidad antioxidante, estas diferencias significativas pueden ser producto de la degradación térmicas de compuestos antioxidantes, como compuestos fenólicos, flavonoides y ácido ascórbico; debido al calor empleado durante el proceso de secado (Dorta, Lobo, & González, 2012).

Luego, se tiene que las muestras secadas con microondas poseen una mayor capacidad antioxidante en comparación al secado con ventana refractiva, esto debido a que al añadir el efecto de la radiación electromagnética aumenta la velocidad de secado, por lo que, las

muestras de manzana se exponen menos tiempo a una temperatura elevada. Diversos estudios han reportado este mismo comportamiento al comparar la capacidad antioxidante de sistemas híbridos que emplean microondas con métodos tradicionales convectivos (Zhang, y otros, 2017).

En estudios con ventana refractiva se ha reportado una disminución de la capacidad antioxidante entre 30 a 50%, variando según la temperatura y tiempo de operación (Raghavi, Moses, & Anandharamakrishnan, 2018), en este caso se obtiene un 63% que se debe a la exposición a altas temperaturas por un periodo prolongado. En el caso de secado con microondas no se tienen datos para manzana, se utilizan otros parámetros para estudiar la calidad del producto; para la materia prima se ha reportado valores entre 55,7 a 113,1 ( $\mu\text{mol TE/gbs}$ ), encontrándose el valor de este trabajo dentro del rango (Karaman, Tütem, Sözgen-Başkan, & Apak, 2013).

Se puede observar que la potencia tiene efecto en la capacidad antioxidante, en el caso de este trabajo a menor potencia se conservan mejor los antioxidantes.

La capacidad antioxidante tiene un comportamiento similar al contenido de polifenoles totales, por lo que, los estudios reportados anteriormente aplican también para este parámetro, lo cual implica que la magnitud de la potencia del microondas afecta a este parámetro. Sin embargo, en comparación a la degradación de polifenoles, la degradación de antioxidantes es significativa, lo anterior se debe principalmente a la estabilidad de los polifenoles y los tipos de compuestos con actividad antioxidante (Kidoń & Grabowska, 2021).

En el caso de los polifenoles se ha reportado que son compuestos estables y que su concentración no cambia significativamente durante los procesos de secado, sin embargo, su estructura química puede cambiar debido a la temperatura e intensidad del calor, afectando a su capacidad antioxidante (Manzocco, Calligaris, Mastrocola, Nicoli, & Lericci, 2000). Se ha reportado también que existen diversos compuestos con capacidad antioxidante además de los fenoles, como vitaminas y carotenoides, los cuales se degradan debido a la exposición a calor durante el secado (Kowalska, y otros, 2020). Por lo que, los cambios en la estructura de los polifenoles que afectan a su actividad y la degradación de otros antioxidantes explican la reducción significativa de la capacidad antioxidante mientras que no cambia significativamente el contenido de polifenoles.

#### 4.4.3. Color

A continuación, se presenta en la Figura 25 la diferencia de color ( $\Delta E$ ) de los productos finales de cada método de secado.

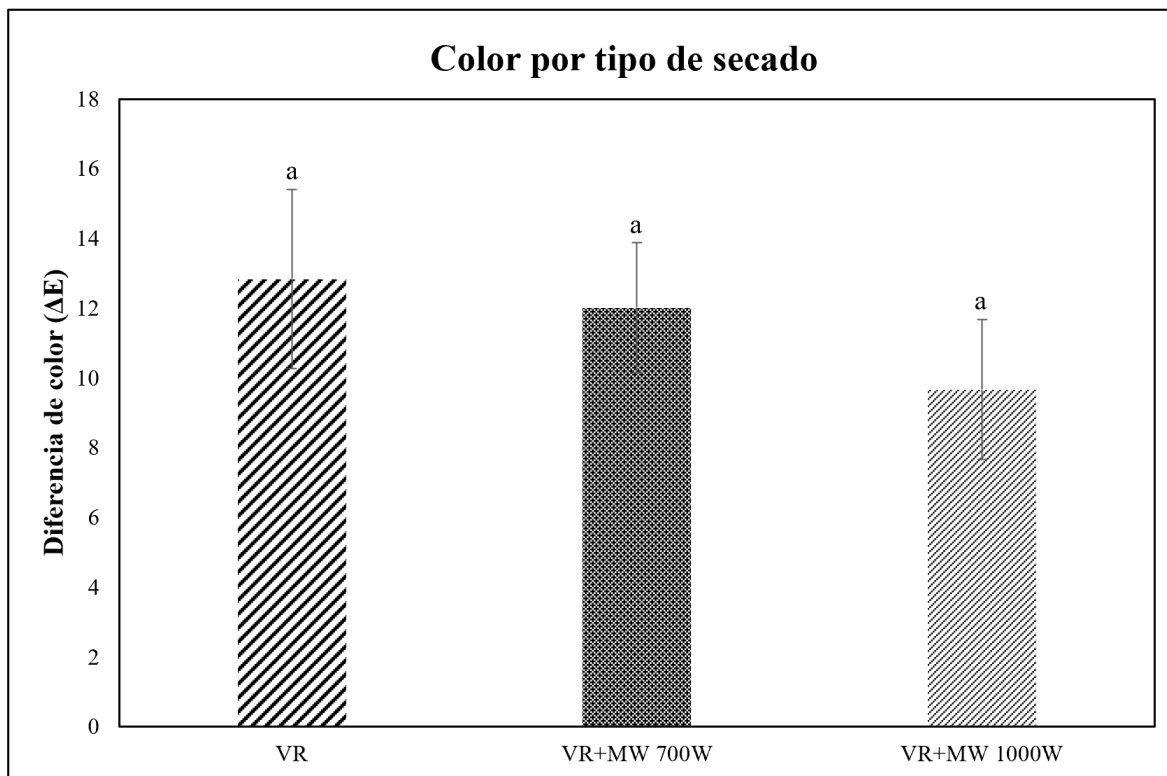


Figura 25. Diferencia de color por experimento

\*Letras diferentes indican diferencias significativas entre mediciones ( $p > 0,05$ ).

Respecto al color por tipo de secado, se puede observar que los valores obtenidos para cada uno de los experimentos no presentan diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0,05$ ).

Se puede observar que para los tres experimentos la diferencia de color es mayor a 3, por lo que la diferencia es significativa, según la clasificación, la percepción en el cambio de color es grande. En diversos estudios para alimentos se ha reportado que al aumentar la potencia del microondas la diferencia de color es significativa, mientras que al comparar métodos de secado híbridos en donde se utiliza microondas la diferencia de color no es significativa en comparación a métodos convectivos tradicionales (Ma, Tian, Wang, Zhao, & Song, 2023).

En este caso el secado con mayor potencia tiene una diferencia de color menor, lo cual podría estar asociado a errores en las mediciones debido a que se toman muestras al azar y a una reducción a la exposición a temperatura, dado el aumento en la velocidad de secado.

En la Tabla 8 se presentan los parámetros  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  obtenidos para cada uno de los métodos de secado y para la materia prima.

*Tabla 8. Parámetros del espacio CIELAB según método de secado*

| <b>Método de Secado</b> | <b><math>L^*</math></b> | <b><math>a^*</math></b> | <b><math>b^*</math></b> |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| MP                      | $69,89 \pm 1,84$        | $-6,21 \pm 1,03$        | $16,68 \pm 2,62$        |
| VR                      | $77,15 \pm 3,00$        | $0,08 \pm 1,06$         | $24,44 \pm 1,71$        |
| VR+MW 700W              | $80,21 \pm 1,47$        | $-1,48 \pm 1,31$        | $19,32 \pm 1,42$        |
| VR+MW 1000W             | $76,77 \pm 1,79$        | $-1,40 \pm 0,96$        | $20,83 \pm 0,23$        |

En el caso del parámetro  $L^*$  se observa que tiende a aumentar, lo cual implica que la luminosidad de las muestras incrementa; para el parámetro  $a^*$  se observa la misma tendencia de incremento, lo que significa una reducción del color verde; mientras que para el parámetro  $b^*$  se observa una tendencia al aumento, significando un aumento en la coloración amarilla.

Para observar mejor las diferencias en los colores de las muestras se presentan imágenes de la materia prima (Figura 26) y las láminas deshidratadas según el método de secado (Figuras 27, 28 y 29).



*Figura 26. Color materia prima*



*Figura 27. Color con VR*



*Figura 28. Color VR+MW 700 W*



*Figura 29. Color VR+MW 1000 W*

#### 4.4.4. Actividad de agua

A continuación, se presenta en la Figura 30 la actividad de agua ( $a_w$ ) de la materia prima y de los productos finales de cada método de secado.

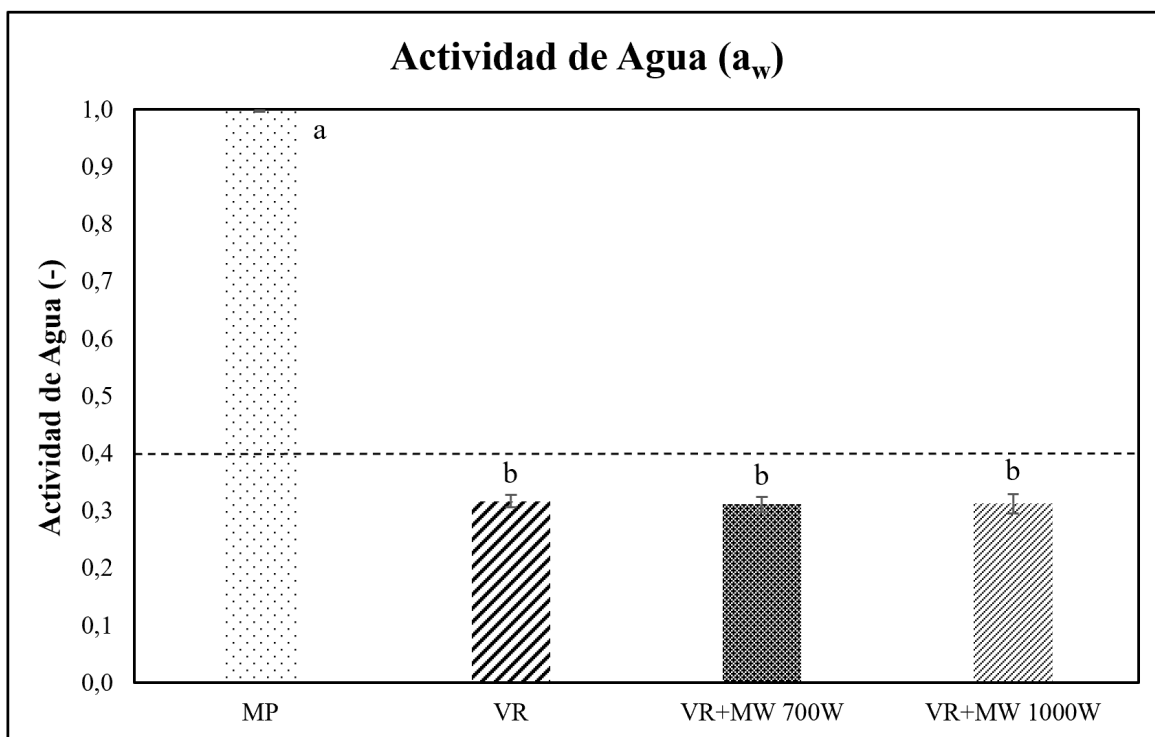


Figura 30. Actividad de agua ( $a_w$ ) por experimento

\*Letras diferentes indican diferencias significativas entre mediciones ( $p > 0,05$ ).

Respecto a la actividad del agua, se puede observar que los valores obtenidos para la materia prima y cada uno de los experimentos no presentan diferencias estadísticamente significativas entre si ( $p \leq 0,05$ ).

Como se puede observar la actividad del agua para cada uno de los método de secado es menor a 0,4, por lo tanto, se logra el objetivo de obtener un producto seco en el cual se puede evitar el crecimiento de microorganismos, por ende, el deterioro del producto en el tiempo.

En el Anexo 5 se presenta una tabla resumen de los valores obtenidos para los parámetros de calidad.

## 4.5. Perfiles de temperatura

A continuación, se presentan los resultados de temperatura para el agua de la ventana refractiva y la temperatura sobre el centro de la muestra, obtenidos para los experimentos en la Tabla 9.

Tabla 9. Resumen perfiles de temperatura

| Método de secado | Temperatura agua (°C)       | Temperatura muestra (°C)     |
|------------------|-----------------------------|------------------------------|
| VR               | 98,577 ± 0,723 <sup>a</sup> | 64,518 ± 5,141 <sup>a</sup>  |
| VR+MW 700 W      | 99,128 ± 3,544 <sup>a</sup> | 56,330 ± 5,148 <sup>a</sup>  |
| VR+MW 1000 W     | 98,629 ± 3,797 <sup>a</sup> | 59,336 ± 11,072 <sup>a</sup> |

\*Letras diferentes indican diferencias significativas entre mediciones ( $p > 0,05$ ).

Respecto a las temperaturas del agua y de las muestras, se puede observar que los valores obtenidos para cada uno de los experimentos no presentan diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0,05$ ) en la misma columna.

Una de las condiciones de operación de los experimentos es la temperatura del agua a 100°C, si bien el valor promedio no corresponde a 100°C se encuentra cercano; este valor promedio se debe a que al comienzo de la operación el agua se enfría en el tiempo muerto donde se colocan las muestras, por lo que, comienza a calentarse desde aproximadamente 80°C al comienzo de la operación; este comportamiento se observó en ambos secados con microondas. En el caso de la ventana refractiva se tiene este valor debido a que el equipo opera abierto a la atmósfera, por lo que, existen fugas de vapor.

Se observa que la temperatura de la muestra en la ventana refractiva es mayor que para el secado con microondas, mientras que para el secado con microondas la temperatura es mayor para la potencia de 1000 W, esto se debe a que el calor entregado por la potencia a las muestras es mayor.

Los resultados de temperatura de la muestra tienen relación con los valores de coeficiente difusivo obtenidos, notándose que para una mayor temperatura se tiene un coeficiente superior, ya que según la ecuación de Arrhenius la difusividad depende de la temperatura.

Además, según los resultados de los parámetros de calidad en el secado con microondas a 700 W se conservan mejor los polifenoles y la capacidad antioxidante de las muestras, lo cual se condice con los estudios de calidad de los alimentos, donde se indica que los compuestos fenólicos y antioxidantes son sensibles a los procesos térmicos a altas temperaturas, por lo que, a una menor temperatura la degradación es menor (Bibi Sadeer, Montesano, Albrizio, Zengin, & Mahomoodally, 2020).

En el Anexo 6 se presentan las curvas de temperatura, para poder observar el comportamiento descrito.

#### 4.6.Capacidad de procesamiento y eficiencia energética

Se determina que la capacidad de procesamiento del equipo es de 0,58 (kg/m<sup>2</sup>), esto se obtiene considerando que entran 22 láminas de manzana, con una masa de 2,614 (g) en el recipiente de vidrio sobre el Mylar y que las dimensiones del microondas son 32x31 (cm).

La capacidad se ve limitada producto del tamaño de recipientes disponibles en el mercado, puesto que queda un espacio remanente entre los bordes del recipiente de vidrio y las paredes del microondas.

Adicionalmente, se obtiene la energía requerida y consumida para mantener el agua a la temperatura de operación (100 °C) y por batch de secado, donde se incluye el calentamiento de agua y deshidratación de manzanas, por cada potencia utilizada en los experimentos. Ambas energías se obtienen luego de que el agua se encuentra a 100°C para iniciar el proceso y considerando la masa de un batch igual a 0,058 (kg). A continuación, se presentan los resultado en la Tabla 10.

*Tabla 10. Energía consumida y necesaria por batch según potencia de secado en VR+MW*

| <b>Tipo de Energía</b>                                 | <b>700 W</b> | <b>1000 W</b> |
|--------------------------------------------------------|--------------|---------------|
| Energía necesaria para mantener agua a 100 °C (kWh/kg) | 6,60         | 5,29          |
| Energía necesaria por batch (kWh/kg)                   | 10,14        | 8,41          |
| Energía consumida para mantener agua a 100 °C (kWh/kg) | 14,73        | 8,20          |
| Energía consumida por batch (kWh/kg)                   | 15,24        | 8,71          |
| <b>Eficiencia térmica (%)</b>                          | <b>47</b>    | <b>67</b>     |

Se obtiene que la energía necesaria por batch de secado para la potencia a 1000 W es menor en un 15% en relación con la potencia de 700 W, mientras que la energía consumida a potencia de 1000 W es menor en un 40% en relación con la potencia de 700 W. Luego, se tiene que la eficiencia térmica del microondas es 47% para una potencia de 700 W y 67% para una potencia de 1000 W.

Además, se observa que la energía es utilizada principalmente en mantener el agua a las condiciones de operación, por lo que se puede reducir su consumo disminuyendo el nivel del agua en futuras experimentaciones.

De lo anterior, se concluye que a mayor potencia la eficiencia térmica es mayor, esto debido a que el tiempo de secado es menor y se utiliza una mayor cantidad de energía para el mismo consumo energético, ya que el microondas utiliza 1502 W para su funcionamiento independiente de la potencia seleccionada, empleándose mejor el recurso energético.

En estudios realizados con tecnologías híbridas, microondas y aire caliente, se han reportado valores de eficiencia entre 21,1% a 42,6% (An & et. al, 2024), por lo tanto, en este estudio se logran mejores eficiencias. Además, en otro estudio se reporta que el secado en microondas a mayor potencia consume menos energía en comparación a un horno tradicional (Septya Kusuma & et. al, 2024).

# Capítulo V

---

## Conclusiones

## 5. Conclusiones

El secado con ventana refractiva acoplado a microondas presenta mejores parámetros de calidad y tiempos de secado que la ventana refractiva, haciéndolo un sistema de secado más eficiente incluso al compararlo a los sistemas tradicionales que se utilizan actualmente.

Se obtiene que al utilizar el microondas el tiempo de secado se reduce en un 42% para la potencia de 700 W y 67% para la potencia de 1000 W, en comparación con ventana refractiva, lo cual indica un efecto significativo en la potencia del microondas y el uso del sistema híbrido en los tiempos de secado, lo cual concuerda con lo planteado inicialmente respecto a que los sistemas híbridos reducen el tiempo de secado.

Al validar la segunda ley de Fick y el modelo de difusión anómalo se obtiene que el coeficiente de difusión efectivo es mayor para secado con microondas a mayor potencia y que el modelo anómalo representa de mejor manera el comportamiento de la cinética de secado del proceso de deshidratación, obteniéndose el mejor ajuste para el sistema híbrido a 1000 W de potencia.

Al analizar los parámetros de calidad obtenidos por método de secado se tiene una disminución no significativa en el contenido de polifenoles totales y significativa en la cantidad de antioxidantes en comparación con la materia prima, los resultados indican que la temperatura de la muestra de manzana y la potencia del microonda afectan a estos parámetros. En específico, se determina que el secado con microondas a 700 W conserva mejor las propiedades de la manzana, en cambio, el secado con ventana refractiva obtiene los parámetros de calidad más reducidos. A pesar de los cambios en los polifenoles y capacidad antioxidante, el sistema híbrido permite obtener mejor calidad del producto final, lo cual es beneficio para los consumidores.

En lo que respecta al color, se percibe una diferencia significativa entre las muestras de los secados y la materia prima, la ventana refractiva obtiene la mayor diferencia de color y el secado con microondas a 1000 W obtiene la menor diferencia.

En el caso de las eficiencias energéticas, se obtiene que el secado en microondas a mayor potencia es más eficiente que el secado a menor, esto debido a la reducción en los tiempos de secado.

Finalmente, se concluye que el sistema de secado de ventana refractiva acoplado a microondas es una tecnología novedosa que cumple con los nuevos requisitos de los consumidores al entregar un producto de alta calidad en tiempos reducidos.

## 6. Recomendaciones

Para futuras investigaciones con el sistema se recomienda:

- Trabajar con fibras ópticas de mayor espesor para evitar su desgaste durante su utilización.
- Trabajar con una fuente de vidrio de mayor tamaño para emplear todo el espacio disponible en el microondas y tener una mayor capacidad de procesamiento.
- Añadir un elemento conductivo al agua, como NaCl, para quizás poder trabajar a una potencia de 500 W y realizar una comparación de resultados más amplia.
- Reducir el nivel de agua en el sistema de ventana refractiva acoplada a microondas.

## 7. Referencias

- An, J., & et. al. (2024). Study on the characteristics and kinetics of microwave hot air combined drying of peanut pods. *Case Studies in Thermal Engineering*, 60. doi:10.1016/j.csite.2024.104640
- Anggraini, T., Febrianti, F., Aisman, & Didi Ismanto, S. (2016). Black Tea With Averrhoa bilimbi L Extract: A Healthy Beverage. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 9, 241-252. doi:10.1016/j.aaspro.2016.02.141
- AOAC. (1996). AOAC Official Method 934.06 Moisture in Dried Fruits.
- Barbosa-Cánovas, G., & Juliano, P. (2004). Adaptation of Classical Processes to New Technical Developments and Quality Requirements. *Journal of Food Science*, 69, E240-E250. doi:10.1111/j.1365-2621.2004.tb10715.x
- Belščak-Cvitanović, A., Durgo, K., Huđek, A., Bačun-Družina, V., & Komes, D. (2018). Polyphenols: Properties, Recovery, and Applications. Woodhead Publishing. doi:10.1016/B978-0-12-813572-3.00001-4
- Bernaert, N., Van Droogenbroeck, B., Van Pamel, E., & De Ruyck, H. (2019). Innovative refractance window drying technology to keep nutrient value during processing. *Trends in Food Science & Technology*, 84, 22-24. doi:10.1016/j.tifs.2018.07.029
- Bibi Sadeer, N., Montesano, D., Albrizio, S., Zengin, G., & Mahomoodally, M. (2020). The Versatility of Antioxidant Assays in Food Science and Safety-Chemistry, Applications, Strengths, and Limitations. *Antioxidants*, 9(8), 709. doi:10.3390/antiox9080709
- Brittany, H. (2002). Microwave Synthesis: Chemistry at the Speed of Light. Matthews: CEM Publishing.
- Chandrasekaran, S., Ramanathan, S., & Basak, T. (2013). Microwave food processing—A review. *Food Research International*, 52(1), 243–261. doi:10.1016/j.foodres.2013.02.033
- Corzo, O. (2011). Determinación experimental del coeficiente de difusión del agua durante el secado de láminas de coroba. *Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 23(1), 36-42.
- Dorta, E., Lobo, M. G., & González, M. (2012). Using drying treatments to stabilise mango peel and seed: Effect on antioxidant activity. *LWT - Food Science and Technology*, 45(2), 261-268. doi:10.1016/j.lwt.2011.08.016
- Ekezie, F., Sun, D., Han, Z., & Cheng, J. (2017). Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. *Trends in Food Science and Technology*, 67, 58-69. doi:10.1016/j.tifs.2017.05.014
- Fellows, P. (2017). Properties of food and principles. En *Food Processing Technology: Principles and Practice* (4° ed., págs. 3-200). Woodhead Publishing. doi:10.1016/b978-0-08-100522-4.00001-8
- Feng, H., Yin, Y., & Tang, J. (2012). Microwave Drying of Food and Agricultural Materials:

- Basics and Heat and Mass Transfer Modeling. *Food Engineering Reviews*, 4(2), 89-106. doi:10.1007/s12393-012-9048-x
- Foti, M. (2015). Use and Abuse of the DPPH(•) Radical. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63, 8765-8776. doi:10.1021/acs.jafc.5b03839
- Francis, F. (1995). Quality as influenced by color. *Food Quality and Preference*, 6(3), 149-155. doi:10.1016/0950-3293(94)00026-r
- Franco, S., & et. al. (2019). Dehydration of salmon (Atlantic salmon), beef, and apple (Granny Smith) using Refractance window™: Effect on diffusion behavior, texture, and color changes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 8-16. doi:10.1016/j.ifset.2018.12.001
- Guzik, P., Kulawik, P., Zając, M., & Migdał, W. (2022). Microwave applications in the food industry: an overview of recent developments. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62:29, 7989-8008. doi:https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1922871
- Hii, C., Ong, S., Yap, J., Putranto, A., & Mangindaan, D. (2021). Hybrid drying of food and bioproducts: a review. *Drying Technology*, 39(11), 1554-1576. doi:10.1080/07373937.2021.1914078
- Horuz, E., Bozkurt, H., Karataş, H., & Maskan, M. (2017). Effects of hybrid (microwave-convectional) and convectional drying on drying kinetics, total phenolics, antioxidant capacity, vitamin C, color and rehydration capacity of sour cherries. *Food Chemistry*, 230, 295-305. doi:10.1016/j.foodchem.2017.03.046
- Joardder, M., Karim, A., & Kumar, C. (2013). Effect of temperature distribution on predicting quality of microwave dehydrated food. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 5, 562-568. doi:10.15282/jmes.5.2013.2.0053
- Karaman, S., Tütem, E., Sözgen-Başkan, K., & Apak, R. (2013). Comparison of antioxidant capacity and phenolic composition of peel and flesh of some apple varieties. *Journal of the science of food and agriculture*, 93. doi:10.1002/jsfa.5810
- Karim, A., Rehman, A., Zhang, L., Asia, N., Ahmad, S., Usman, M., & Mahdi Jafari, S. (2023). Introduction to thermal food processes by steam and hot water. En *Thermal Processing of Food Products by Steam and Hot Water* (págs. 3-26). Woodhead Publishing. doi:10.1016/C2018-0-04536-3
- Kidoń, M., & Grabowska, J. (2021). Bioactive compounds, antioxidant activity, and sensory qualities of red-fleshed apples dried by different methods. *LWT - Food Science and Technology*, 136(2). doi:10.1016/j.lwt.2020.110302
- Kowalska, J., Marzec, A., Domian, E., Galus, S., Ciurzyńska, A., Lenart, A., & Kowalska, H. (2020). The Use of Antioxidant Potential of Chokeberry Juice in Creating Pro-Healthy Dried Apples by Hybrid (Convection-Microwave-Vacuum) Method. *Molecules*, 25. doi:10.3390/molecules25235680
- Kubra, I., & Jagan Mohan Rao, L. (2012). Microwave drying of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe) and its effects on polyphenolic content and antioxidant activity. *International Journal of Food Science & Technology*, 47, 2311-2317. doi:10.1111/j.1365-2621.2012.03104.x

- Kumar, C., Joardder, M. U., Farrell, T., Millar, G., & Karim, A. (2016). Mathematical model for intermittent microwave convective drying of food materials. *Drying Technology*, 34(8), 962-973. doi:10.1080/07373937.2015.1087408
- Lim, Y., & Murtijaya, J. (2007). Antioxidant properties of *Phyllanthus amarus* extracts as affected by different drying methods. *LWT - Food Science and Technology*, 40(9), 1664-1669. doi:10.1016/j.lwt.2006.12.013
- López, A., & Di Sarli, A. (2016). Cielab model, color-difference formulas and use of the european en 12878 standard in colored mortars and concretes. *Ciencia y Tecnología de los Materiales*, 6.
- Ma, Y., Tian, X., Wang, Y., Zhao, H., & Song, J. (2023). Comparative Study on Drying Characteristics and Quality of Apple Cubes Dried in Two Different Microwave Dryers. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 73(4), 367-374. doi:10.31883/pjfn/174972
- Malekjani, N., Jafari, S., Rahmati, M., Zadeh, E., & Mirzaee, H. (2013). Evaluation of thin-layer Drying Models and Artificial Neural Networks for Describing Drying Kinetics of Canola Seed in a Heat Pump Assisted Fluidized Bed Dryer. *International Journal of Food Engineering*, 9(4), 375-384. doi:10.1515/ijfe-2012-0136
- Manzocco, L., Calligaris, S., Mastrocola, D., Nicoli, M. C., & Lerici, C. R. (2000). Review of non-enzymatic browning and antioxidant capacity in processed foods. *Trends in Food Science & Technology*, 11(9-10), 340-346. doi:10.1016/S0924-2244(01)00014-0
- Mey Chuah, A., Lee, Y.-C., Yamaguchi, T., Takamura, H., Yin, L.-J., & Matoba, T. (2008). Effect of cooking on the antioxidant properties of coloured peppers. *Food Chemistry*, 111(1), 20-28. doi:10.1016/j.foodchem.2008.03.022
- Miranda, J. (2018). Clasificación automática de naranjas por tamaño y por defectos utilizando técnicas de visión por computadora.
- Moses, J. A., Norton, T., Alagusundaram, K., & et al. (2014). Novel Drying Techniques for the Food Industry. *Food Eng Rev*, 6, 43-55. doi:https://doi.org/10.1007/s12393-014-9078-7
- Musielak, G., Mieszczakowska-Frac, M., & Mierzwa, D. (2024). Convective Drying of Apple Enhanced with Microwaves and Ultrasound—Process Kinetics, Energy Consumption, and Product Quality Approach. *Applied Sciences*, 14(3). doi:10.3390/app14030994
- Nindo, C., & Tang, J. (2007). Refractance Window Dehydration Technology: A Novel Contact Drying Method. *Drying Technology: An International Journal*, 25:1, 37-48. doi:https://doi.org/10.1080/07373930601152673
- Núñez, H., Jaques, A., Belmonte, K., Elitin, J., Valdenegro, M., Ramírez, C., & Córdova, A. (2024). Development of an Apple Snack Enriched with Probiotic *Lactobacillus rhamnosus*: Evaluation of the Refractance Window Drying Process on Cell Viability. *Foods*, 13, 1756. doi:10.3390/foods13111756
- Occupational Safety and Health Standards. (2013). *Nonionizing radiation (Standard Number*

1910.97). Obtenido de <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.97#>

- Ochoa-Martínez, C., & Ayala-Aponte, A. (2005). Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica mathematical models of mass transfer in osmotic dehydration modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica. *CYTA-Journal of Food*, 4(5), 330-342. doi:10.1080/11358120509487660
- Orsat, V., Changrue, V., & Raghavan, V. (2006). Microwave drying of fruits and vegetables. *Stewart Postharvest Review*, 2, 1-7. doi:10.2212/spr.2006.6.4
- Pandey, K., & Rizvi, S. (2009). Plant Polyphenols as Dietary Antioxidants in Human Health and Disease. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2(5), 270-278. doi:10.4161/oxim.2.5.9498
- Priecina, L., Karklina, D., & Kince, T. (2018). The impact of steam-blanching and dehydration on phenolic, organic acid composition, and total carotenoids in celery roots. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 49, 192-201. doi:10.1016/j.ifset.2018.01.008
- Quitral, V. S. (2014). Antioxidant capacity and total polyphenol content in different apple varieties cultivated in Chile.
- Raghavi, L., Moses, J., & Anandharamakrishnan, C. (2018). Refractance window drying of foods: A review. *Journal of Food Engineering*, 222, 267-275. doi:10.1016/j.jfoodeng.2017.11.032
- Rahman, M. (2020). *Handbook of Food Preservation* (3<sup>o</sup> ed.). CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/9780429091483>
- Ramírez, C., Astorga, V., Nuñez, H., Jaques, A., & Simpson, R. (2017). Anomalous diffusion based on fractional calculus approach applied to drying analysis of apple slices: The effects of relative humidity and temperature. *Journal of Food Process Engineering*, 40(5). doi:10.1111/jfpe.12549
- Sadowska-Bartosz, I., & Bartosz, G. (2022). Evaluation of The Antioxidant Capacity of Food Products: Methods, Applications and Limitations. *Processes*, 10(10), 2031. doi:10.3390/pr10102031
- Septya Kusuma, H., & et. al. (2024). Experimental investigation in the drying process of moringa leaves using microwave drying: Drying kinetics, energy consumption, and CO2 emission. *Applied Food Research*, 4(1). doi:10.1016/j.afres.2024.100401
- Simpson, R., Ramírez, C., Birchmeier, V., Almonacid, A., Moreno, J., Nuñez, H., & Jaques, A. (2015). Diffusion mechanisms during the osmotic dehydration of Granny Smith apples subjected to a moderate electric field. *Journal of Food Engineering*, 166, 204-211. doi:10.1016/j.jfoodeng.2015.05.027
- Vega-Castro, O., Osorio-Arias, J., Duarte-Correa, Y., Jaques, A., Ramírez, C., Núñez, H., & Simpson, R. (2023). Critical Analysis of the Use of Semiempirical Models on the Dehydration of Thin-Layer Foods Based on Two Study Cases. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 48, 15851-15863. doi:10.1007/s13369-023-07623-0
- Vega-Gálvez, A., & et. al. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics,

- antioxidant capacity, total phenolic content, colour, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry*, 132, 51-59. doi:10.1016/j.foodchem.2011.10.029
- Xu, Y., & et. al. (2020). A comparative evaluation of nutritional properties, antioxidant capacity and physical characteristics of cabbage (*Brassica oleracea* var. Capitata var L.) subjected to different drying methods. *Food Chemistry*, 309. doi:10.1016/j.foodchem.2019.06.002
- Zarein, M., Samadi, S. H., & Ghobadian, B. (2015). Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 14(1), 41-47. doi:10.1016/j.jssas.2013.06.002
- Zeng, S., Wang, B., Lv, W., & Wu, Y. (2023). Effects of microwave power and hot air temperature on the physicochemical properties of dried ginger (*Zingiber officinale*) using microwave hot-air rolling drying. *Food Chemistry*, 404(B). doi:10.1016/j.foodchem.2022.134741
- Zhang, M., Chen, H., Mujumdar, S., A., Tang, J., Miao, S., & Wang, Y. (2017). Recent developments in high-quality drying of vegetables, fruits, and aquatic products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(6), 1239-1255. doi:10.1080/10408398.2014.979280
- Zhang, M., Jiang, H., & Lim, R.-X. (2010). Recent Developments in Microwave-Assisted Drying of Vegetables, Fruits, and Aquatic Products—Drying Kinetics and Quality Considerations. *Drying Technology: An International Journal*, 28:11, 1307-1316. doi:10.1080/07373937.2010.524591

## 8. Anexos

### 8.1. Anexo 1: Sistema de extracción de aire en ventana refractiva acoplada a microondas



Figura 31. Sistema de extracción de aire Nagashi modelo DP200A

### 8.2. Anexo 2: Curvas de secado

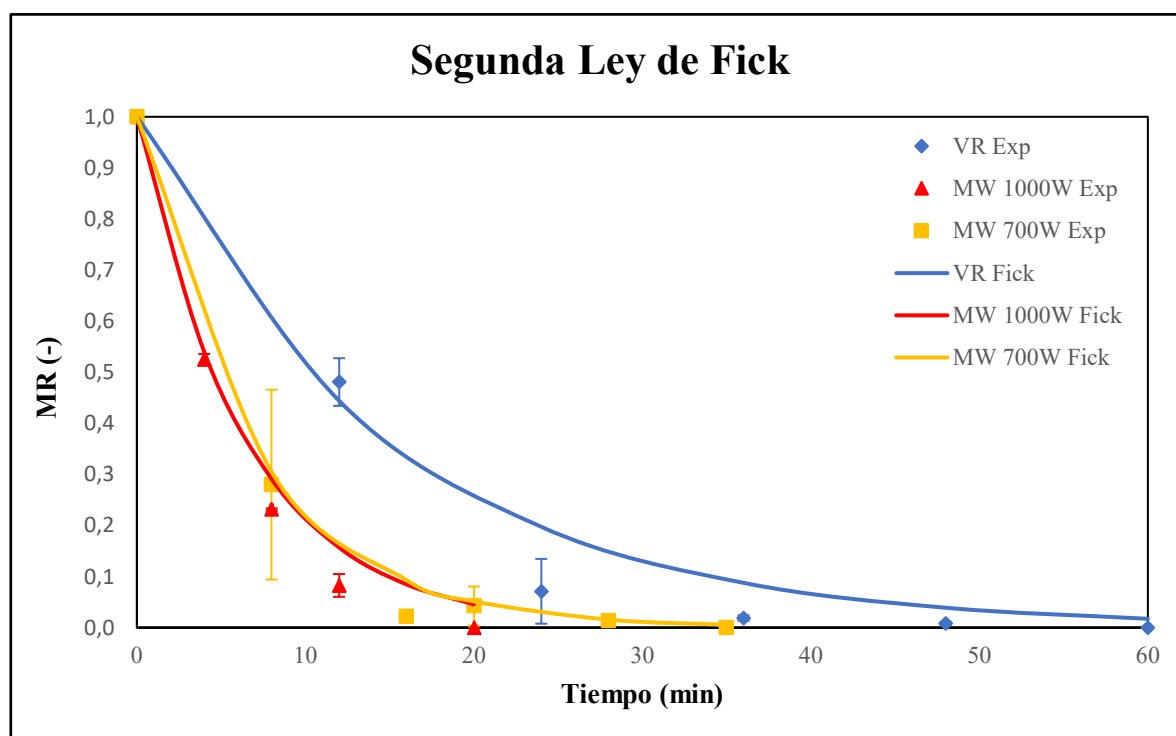


Figura 32. Curva de secado experimental y teórica para segunda ley de Fick sin norma AOAC

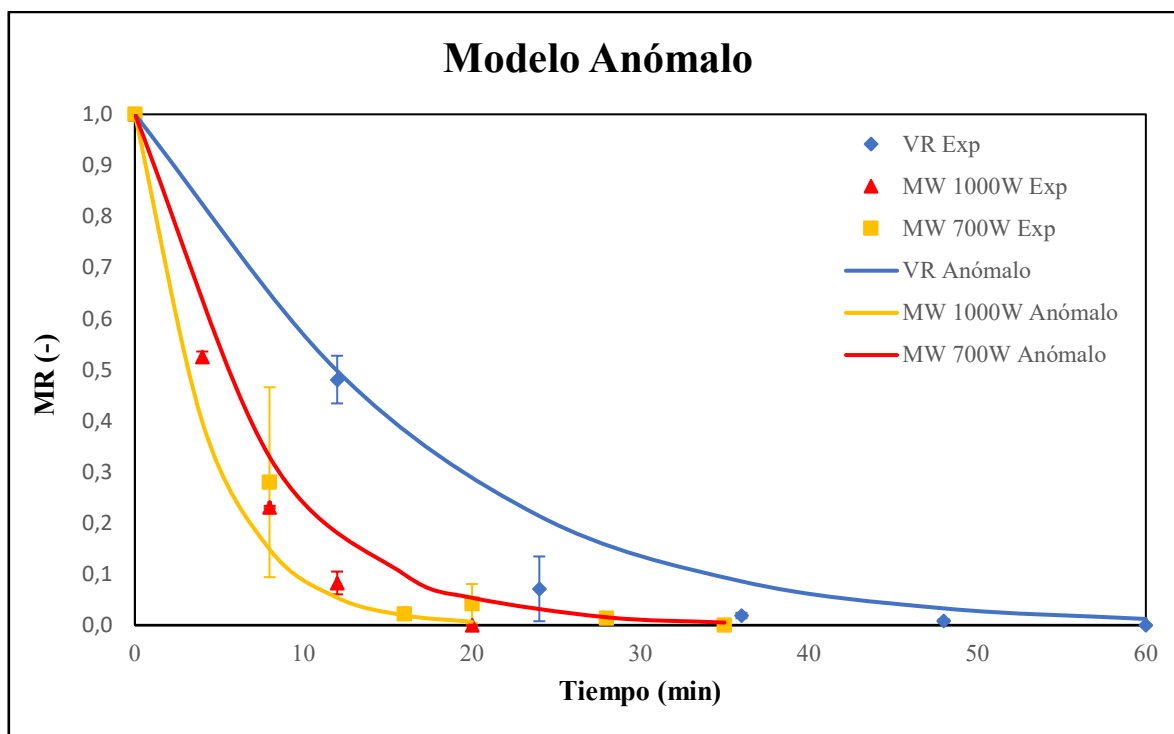


Figura 33. Curva de secado experimental y teórica para modelo anómalo sin norma AOAC

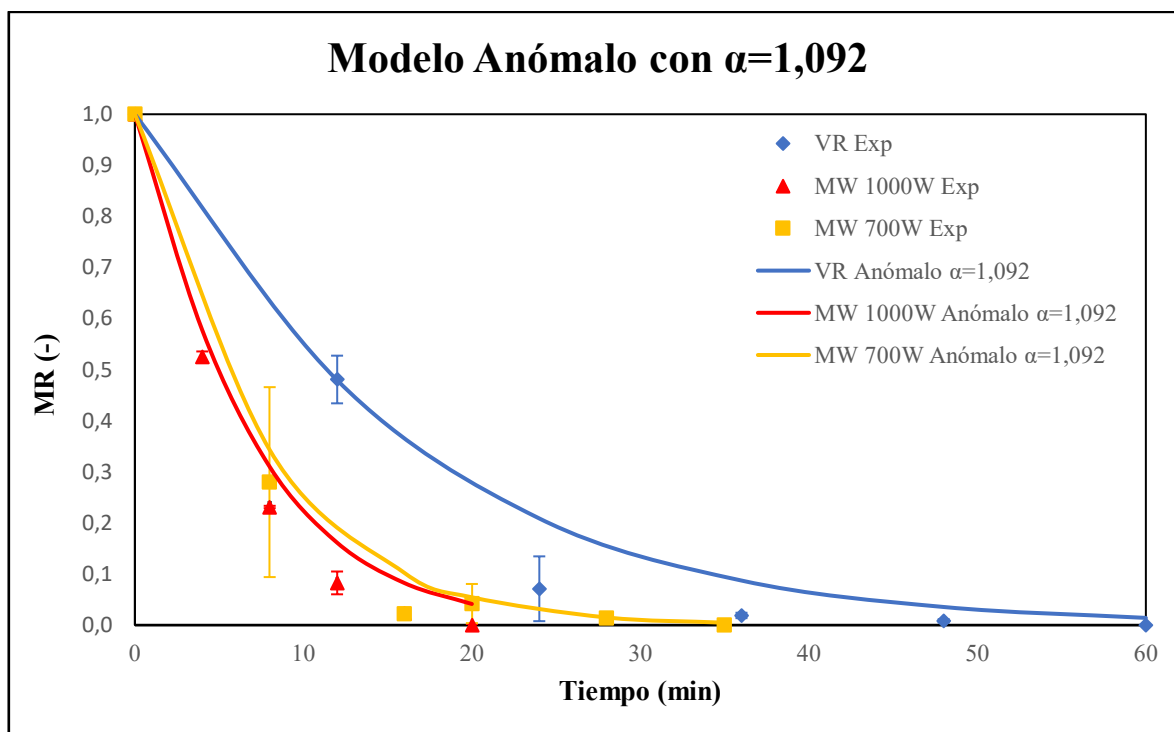


Figura 34. Curva de secado experimental y teórica para modelo anómalo con  $\alpha=1,092$  sin norma AOAC

### 8.3. Anexo 3: Curva de calibración de ácido gálico equivalente

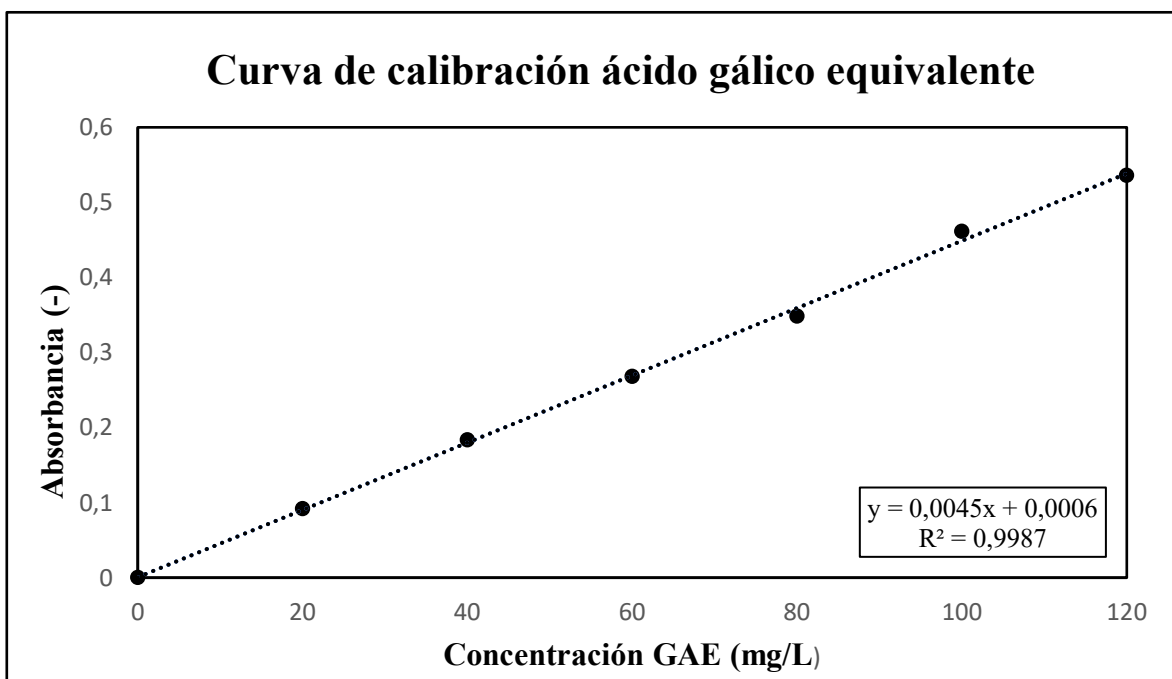


Figura 35. Curva de calibración ácido gálico equivalente

### 8.4. Anexo 4: Curva de calibración Trolox equivalente

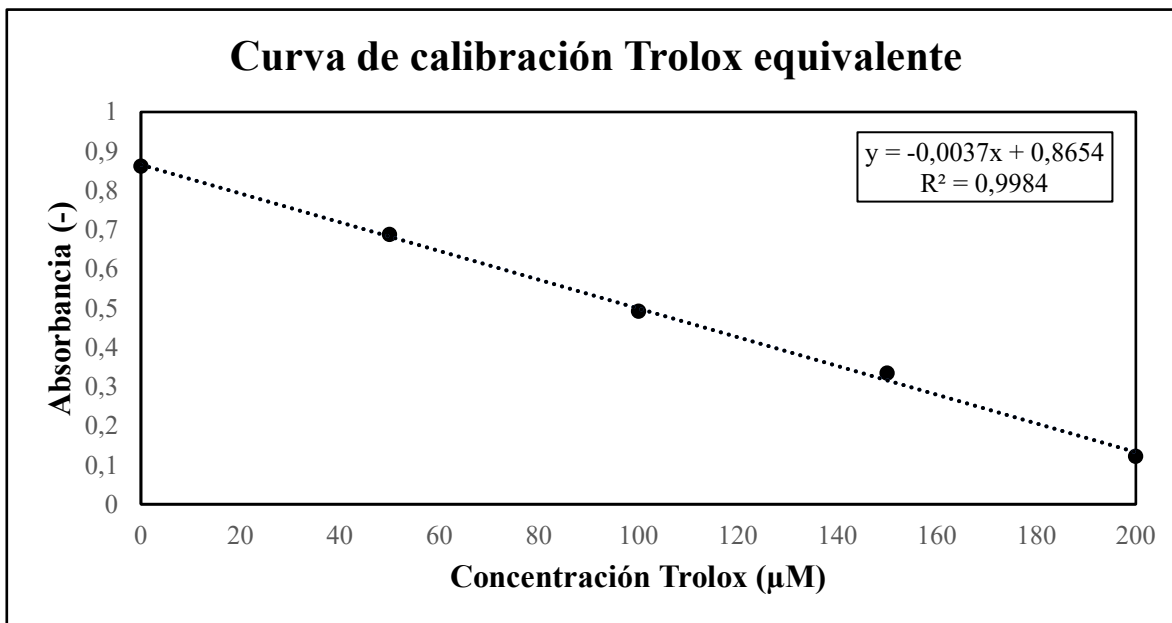


Figura 36. Curva de calibración Trolox equivalente

## 8.5. Anexo 5: Tabla resumen parámetros de calidad

Tabla 11. Tabla resumen parámetros de calidad

| Parámetro      | $a_w$ (-)         | Humedad (g<br>agua/g<br>muestra) | PFT (mg<br>GAE/gbs) | CA (mg<br>Trolox/gbs) | $\Delta E$         |
|----------------|-------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|
| MP             | $0,997 \pm 0,001$ | $0,893 \pm 0,006$                | $10,023 \pm 0,548$  | $91,678 \pm 14,023$   | -                  |
| VR             | $0,317 \pm 0,011$ | $0,912 \pm 0,003$                | $8,006 \pm 2,007$   | $34,118 \pm 2,2556$   | $12,833 \pm 2,572$ |
| VR+MW<br>700W  | $0,311 \pm 0,013$ | $0,901 \pm 0,000$                | $9,950 \pm 0,412$   | $46,117 \pm 0,458$    | $12,013 \pm 1,857$ |
| VR+MW<br>1000W | $0,312 \pm 0,017$ | $0,903 \pm 0,002$                | $8,914 \pm 0,306$   | $40,842 \pm 1,305$    | $9,667 \pm 2,005$  |

## 8.6. Anexo 6: Curvas de temperatura

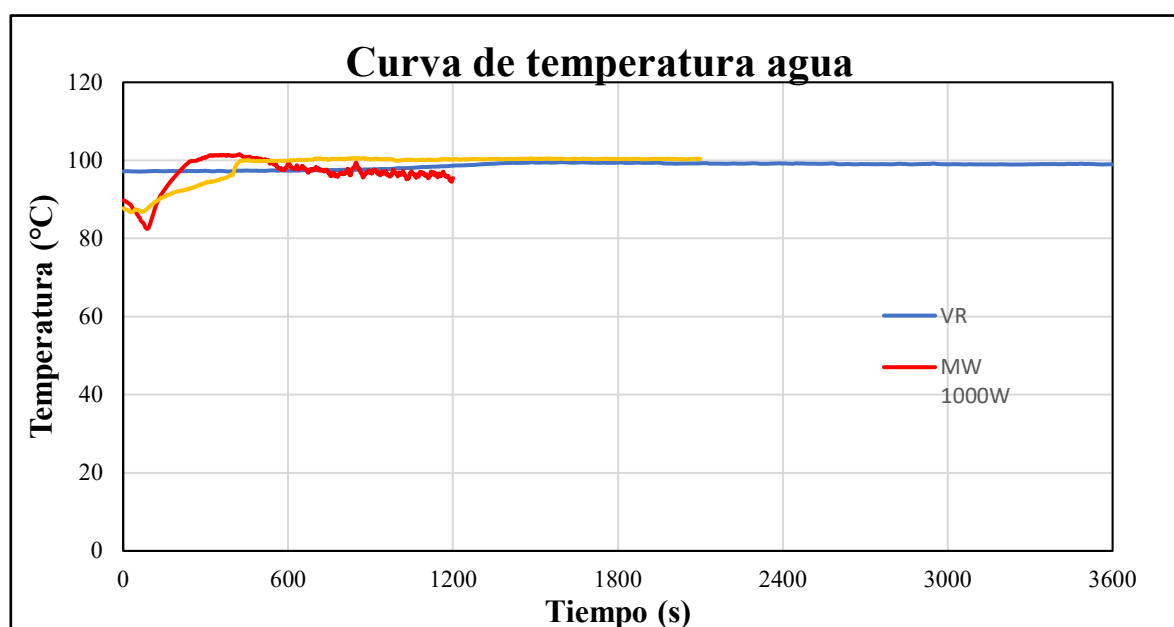


Figura 37. Curva de temperatura agua para experimentos

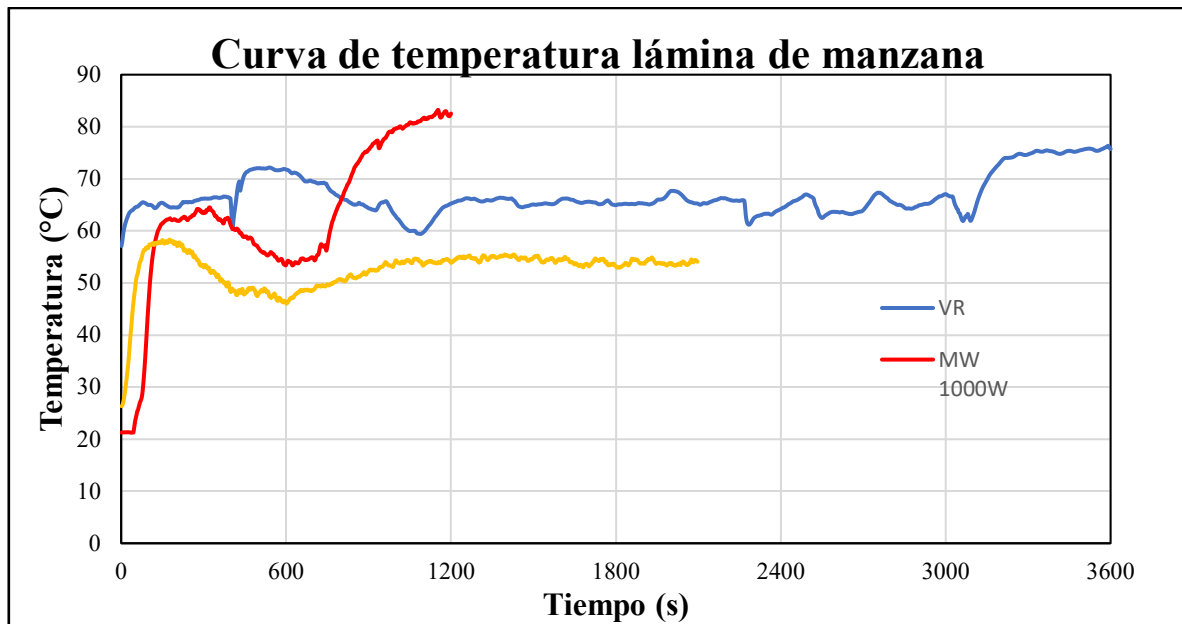


Figura 38. Curva de temperatura lámina de manzana para experimentos