

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

VALPARAISO – CHILE



“Estudio del efecto de la deshidratación de hongos mediante el efecto combinado de ventana refractiva y microondas: evaluación de cinética y calidad final del producto”

Ignacio Alejandro Figueroa Riquelme

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL QUÍMICO**

PROFESOR GUÍA: Dr. Cristian Ramírez Bustos

PROFESORES CORREFERENTES: Dr. Sergio Almonacid Merino

Noviembre 2023

Resumen

En el área de procesamiento de alimentos la deshidratación es un proceso lento que incide negativamente en la calidad del producto final, principalmente reduciendo sus nutrientes y cualidades organolépticas. Los exigentes consumidores de hoy en día han incidido en que la industria busque nuevas tecnologías, una de ellas es la ventana refractiva, la cual ha mostrado reducir tiempos de secado y aumentando la calidad del producto. Por otra parte, el microondas si bien logra la deshidratación de los alimentos en menores tiempos que otras tecnologías, tiene una baja retención de colores y nutrientes, debido a la formación de zonas calientes. Una opción altamente estudiada en la actualidad son los sistemas híbridos, como la combinación de la ventana refractiva y microondas. El objetivo de la investigación es diseñar y optimizar el secado en ventana refractiva acoplada a microondas utilizando hongos comestibles como alimento modelo, evaluando su cinética, calidad final y eficiencia energética.

Para lograr el objetivo de la investigación se utilizaron láminas de 3 mm de espesor y 30 mm de diámetro pretratadas con un escaldado, para luego ser deshidratadas mediante ventana refractiva a las temperaturas de 80 y 90°C como control cinético y de calidad; se realiza también un secado en túnel de secado y liofilización como control de calidad. La deshidratación en ventana refractiva acoplada a microondas también se realizó a 80 y 90°C, usando las potencias de 90, 180 y 360W, donde el proceso se considera finalizado cuando se alcanza la actividad de agua igual o menor a 0.4.

Se obtiene que, al utilizar el microondas acoplado a ventana refractiva, para la mayor potencia se disminuyen los tiempos de secado en un 63 y un 69% para las temperaturas de 80 y 90°C respectivamente en comparación con ventana refractiva. Mientras que para la menor potencia se redujo un 30 y un 36% el tiempo de secado.

En los parámetros de calidad nutricional se observa una reducción en el contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante al comparar el producto deshidratado con el fresco, donde la temperatura y la potencia inciden significativamente. No obstante, se obtiene una calidad similar a la liofilización, aunque en el color a las mayores potencias tiene una variación significativa. La eficiencia energética en el sistema híbrido es mayor a los 90 y 180W comparado con la ventana refractiva, aumentando aproximadamente en un 60 y 20 % respectivamente.

Finalmente, el secado con ventana refractiva acoplada a microondas proporciona un producto de alta calidad, similar a la liofilización. En cuanto a la cinética de secado, el tiempo de procesamiento disminuye en comparación con la ventana refractiva, lo que aumenta la eficiencia energética.

Abstract

In the area of food processing, dehydration is a slow process that negatively affects the quality of the final product, mainly by reducing its nutrients and organoleptic qualities. Today's demanding consumers have caused the industry to seek new technologies, one of them is the refractive window, which has been shown to reduce drying times and increase product quality. On the other hand, although the microwave dehydrates food in less time than other technologies, it has low retention of colors and nutrients, due to the formation of hot zones. A highly studied option currently is hybrid systems, such as the combination of the refractive window and microwaves. The objective of the research is to design and optimize drying in a refractive window coupled to microwaves using edible mushrooms as a model food, evaluating their kinetics, final quality and energy efficiency.

To achieve the objective of the research, sheets 3 mm thick and 30 mm in diameter were used, pretreated with blanching, and then dehydrated through a refractive window at temperatures of 80 and 90°C as kinetic and quality control; Drying is also carried out in a drying tunnel and freeze-drying as quality control. Dehydration in a refractive window coupled to microwaves was also carried out at 80 and 90°C, using the powers of 90, 180 and 360W, where the process is considered completed when a water activity equal to or less than 0.4 is reached.

It is obtained that, when using the microwave coupled to a refractive window, for the highest power the drying times are reduced by 63 and 69% for temperatures of 80 and 90°C respectively compared to the refractive window. While for the lower power the drying time was reduced by 30 and 36%.

In the nutritional quality parameters, a reduction in the content of total polyphenols and antioxidant capacity is observed when comparing the dehydrated product with the fresh one, where temperature and power have a significant impact. However, a quality similar to freeze-drying is obtained, although the color at higher powers has a significant variation. The energy efficiency in the hybrid system is greater at 90 and 180W compared to the refractive window, increasing by approximately 60 and 20% respectively.

Finally, drying with a microwave-coupled refractive window provides a high-quality product, similar to freeze-drying. Regarding drying kinetics, the processing time decreases compared to the refractive window, which increases energy efficiency.

Contenidos

Resumen	2
Abstract	3
Contenido	4
Contenido de figuras	6
Contenido de tablas	8
1. Introducción	10
1.1 Objetivos	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos	11
2. Marco teórico	13
2.1 Importancia de la deshidratación de alimentos	13
2.2 Importancia nutricional de los hongos comestibles	14
2.3 Mercado de hongos comestibles	14
2.4 Tecnologías de secado	18
2.5 Análisis matemático del proceso de secado en alimentos	23
2.6 Calidad en productos deshidratados y efectos del tipo de secado	24
2.6.1 Capacidad antioxidante	24
2.6.2 Contenido de polifenoles totales	28
2.7 Propiedades físicas	30
2.7.1 Cambio de color	30
2.7.2 Actividad de agua	32
2.7.3 Textura	33
2.8 Consumo y eficiencia energética	33
3. Materiales y métodos	36
3.1 Materiales	36
3.2 Métodos	37
• Secado en ventana refractiva	38
• Secado en ventana refractiva acoplada a microondas	39
• Secado en túnel con aire caliente	40
• Secado en liofilizador	41

• Determinación y análisis de las curvas de secado	41
• Determinación de actividad de agua y humedad	42
• Extracción metanólica	43
• Determinación del contenido de polifenoles totales	43
• Determinación de la capacidad antioxidante	44
• Determinación de sólidos solubles totales	45
• Determinación de color	46
• Medición de textura	47
• Eficiencia energética	48
• Análisis estadístico	49
4. Resultados y discusión	51
4.1 Caracterización de la materia prima	51
4.2 Determinación de tiempos de secado	52
4.3 Determinación de cinética de secado	58
4.4 Determinación del coeficiente de difusión efectivo	63
4.5 Comparación de humedad y actividad de agua	67
4.6 Contenido de polifenoles totales	68
4.7 Contenido de capacidad antioxidante	70
4.8 Contenido de sólidos solubles totales	72
4.9 Propiedades organolépticas	73
4.9.1 Color	73
4.9.2 Textura	76
4.10 Eficiencia energética	77
5. Conclusiones	80
6. Recomendaciones	81
7. Referencias	83
8. Anexos	89
• Anexo 1: Contenido de sólidos solubles totales y textura	89
• Anexo 2: Contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante	89
• Anexo 3: Curva de calibración polifenoles totales	90
• Anexo 4: Curva de calibración capacidad antioxidante	91

Contenido de figuras

Figura 1. Producción mundial de hongos	15
Figura 2. Esquema ventana refractiva continua	17
Figura 3. Esquema ventana refractiva por lotes	17
Figura 4. Esquema microondas	21
Figura 5. Mecanismo de reacción DPPH	27
Figura 6. Reacción de Folin-Ciocalteu	29
Figura 7. Muestra de hongo <i>Agaricus bisporus</i>	36
Figura 8. Muestra de láminas de hongos	36
Figura 9. Esquema ventana refractiva	38
Figura 10. Secado en ventana refractiva escala laboratorio	39
Figura 11. Secado en microondas acoplado a ventana refractiva a escala laboratorio	40
Figura 12. Estufa convectiva	40
Figura 13. Liofilizador	41
Figura 14. Higrómetro	43
Figura 15. Espectrofotómetro	45
Figura 16. Refractómetro	46
Figura 17. Espectro de colores	46
Figura 18. Colorímetro	47
Figura 19. Texturómetro	48
Figura 20. Medidor de potencia y energía	48
Figura 21. Curvas de actividad de agua a 80°C	53
Figura 22. Curvas de actividad de agua a 90°C	53
Figura 23. Curvas de actividad de agua en pulpa y láminas	54
Figura 24. Perfil de temperatura a 80°C	54
Figura 25. Perfil de temperatura a 90°C	55
Figura 26. Curva de actividad de agua a 80°C con agua saturada	55
Figura 27. Curva de actividad de agua a 90°C con agua saturada	56
Figura 28. Comparación de los tiempos de secado	57
Figura 29. Curvas de secado a 80°C	59
Figura 30. Modelación con la Segunda Ley de Fick a 80°C	60

Figura 31. Modelación con el modelo anómalo a 80°C	60
Figura 32. Curvas de secado a 90°C	61
Figura 33. Modelación con la Segunda Ley de Fick a 90°C	62
Figura 34. Modelación con el modelo anómalo a 90°C	62
Figura 35. Contenido de polifenoles totales	69
Figura 36. Contenido de capacidad antioxidante	71
Figura 37. Sólidos solubles totales	72
Figura 38. Diferencia de color	75
Figura 39. Color materia prima fresca	75
Figura 40. Color secado en ventana refractiva acoplada a microondas	75
Figura 41. Color liofilización	75
Figura 42. Textura	76

Contenido de tablas

Tabla 1. Comparación de eficiencia térmica de distintos equipos	18
Tabla 2. Eficiencia energética en ventana refractiva	19
Tabla 3. Eficiencias energéticas	20
Tabla 4. Eficiencias energéticas en tecnologías híbridas	23
Tabla 5. Capacidad antioxidante de flavonoides	25
Tabla 6. Capacidad antioxidante equivalente en Trolox	26
Tabla 7. Contenido de polifenoles totales	28
Tabla 8. Parámetros de color para distintos secados	31
Tabla 9. Eficiencia energética para distintos secados	34
Tabla 10. Propiedades materia prima	51
Tabla 11. Coeficiente de difusión efectivo con la Segunda Ley de Fick a 80°C	63
Tabla 12. Coeficiente de difusión efectivo con el modelo anómalo a 80°C	64
Tabla 13. Coeficiente de difusión efectivo con la Segunda Ley de Fick a 90°C	64
Tabla 14. Coeficiente de difusión efectivo con el modelo anómalo a 90°C	65
Tabla 15. Comparación de humedad y actividad de agua	67
Tabla 16. Parámetros de color	73
Tabla 17. Eficiencias energéticas	77

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1. Introducción

Una de las formas de conservación de los alimentos en la industria alimenticia suele ser la deshidratación, preservando los nutrientes que estos pueden entregar a los consumidores, ya que al disminuir el agua libre del alimento se previene el deterioro frente a microorganismos y a las reacciones bioquímicas que pueden interferir en la calidad del producto (Simpson et al., 2017). Además, al tener un producto deshidratado se disminuyen los costos de almacenamiento y transporte (Hernández et al., 2017).

Dentro de los alimentos funcionales se tienen los hongos alimenticios, que además de ser una fuente de umami usada en diversas cocinas internacionales, estos poseen compuestos antioxidantes como las vitaminas C, E, D, y también compuestos fenólicos.

Las distintas tecnologías permiten obtener un producto en gránulos, escamas, láminas, polvo, entre otras formas dependiendo de los requisitos del consumidor (Okos et al., 2007). Las tecnologías convencionales que solían usarse en la industria presentan diferentes desventajas, como tiempos de secado muy extensos, una distribución de calor no uniforme, daños estructurales, quemaduras y endurecimiento en ciertas zonas del alimento.

Para disminuir los tiempos de secado, mejorar la calidad del producto final y regulaciones ambientales, como la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y los consumos de energía se están estudiando tecnologías nuevas como el microondas y la ventana refractiva (Chandrasekaran et al., 2013).

El microondas por su parte es comúnmente usado en la deshidratación de alimentos en la industria, debido a sus cortos tiempos de secado, ya que alcanza altas velocidades de secado; no obstante, es más usado como un complemento a otras tecnologías de secado, debido a que por sí solo puede generar quemaduras en la superficie del alimento, pero en complemento puede aumentar la eficiencia térmica del proceso (Chandrasekaran et al., 2013). Experimentos previos demuestran que la deshidratación del hongo *Agaricus bisporus* por el método tradicional de secado por aire caliente demora sobre las 2 horas, mientras que al complementar este método con el microondas el tiempo se reduce a 40 minutos para alcanzar una humedad en base seca de 0.1 kg/kg (Menon, et al., 2020).

Por otra parte, la ventana refractiva al tener cortos tiempos de secado permite una alta retención de nutrientes, color, textura, logrando altas eficiencias térmicas y obteniendo un producto de alta calidad (Mahanti et al., 2021).

En base a esto, la complementación de ambas tecnologías puede permitir obtener productos con alto contenido de polifenoles, antioxidantes y con gran retención de cualidades organolépticas.

1.1 Objetivos:

Objetivo general:

Estudiar la deshidratación de hongos mediante ventana refractiva acoplada a microondas evaluando su cinética de secado, el contenido de actividad de agua, humedad, polifenoles totales, capacidad antioxidante, sólidos solubles totales, color y textura comparado con el método tradicional de secado por aire caliente.

Objetivos específicos:

- Diseñar e implementar el secado de láminas de hongos comestibles en ventana refractiva acoplada a microondas.
- Estudiar el efecto de la potencia de microondas en el tiempo de secado.
- Evaluar las curvas de secado mediante un análisis matemático del modelo de Fick y modelo anómalo para placa plana.
- Evaluar el contenido de actividad de agua, humedad, polifenoles totales, capacidad antioxidante, sólidos solubles totales, color y textura del producto final.
- Determinar la eficiencia energética del secado por ventana refractiva acoplada a microondas y de secado por aire caliente.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2. Marco teórico:

2.1 Importancia de la deshidratación de alimentos

La cultura occidental con el pasar de los años ha profundizado y perfeccionado la técnica de conservación de los alimentos, así como la cultura oriental está enfocada en potenciar sabores y cualidades organolépticas del alimento. Estos puntos de vista permiten tener los alimentos por un tiempo más prolongado cuidando de mantener el aroma, sabor, textura, entre otros aspectos del alimento; sin embargo, los consumidores actuales buscan productos con valores nutricionales altos, pero sin excesiva adición de compuesto químicos o tratamientos térmicos intensos que puedan afectar las cualidades organolépticas del alimento (Hernández, et al., 2017).

Conservar los alimentos sin agregar agentes externos que limiten la cantidad de agua libre de dichos alimentos para el crecimiento y proliferación de los microorganismos que puedan estar presente solo deja como opción un tratamiento térmico; un tratamiento a bajas temperaturas además de tener un costo elevado no eliminara la carga microbiana que pueda tener el alimento, sino que solo ralentizará y/o frenara el crecimiento de los microorganismos. Como solución a esto aparece la opción del secado para eliminar el agua libre del alimento, donde se genera un proceso simultaneo de transferencia de masa y energía con aire caliente reduciendo la actividad enzimática y microbiana (Indiarto, et al., 2021). Este calor es suministrado directa o indirectamente al alimento provocando la evaporación del superficial, es decir, la masa de agua que se encuentra en la en la monocapa y luego el agua interna por conducción se traslada a la superficie (Orphanides, et al., 2016).

La deshidratación de alimentos trae consigo distintas ventajas, como aumentar la vida útil de estos, reducir los costos de manipulación y transporte del producto permitiendo tener disponibilidad de este durante el todo el año. Además, los alimentos deshidratados presentan mayor resistencia frente a un deterioro por actividad de microorganismos, así como también frente a reacciones químicas de deterioro (Raghavi, et al. 2018). Esta técnica es una de las más antiguas para preservar alimentos, y hoy en día en la industria alimentaria es un método muy usado y de gran importancia en el secado de alimentos sólidos.

Esta técnica de secado representa en la industria alimenticia una parte importante en un gran número de países. Donde se hayan empresas que pueden tener desde un secador solar o por aire caliente hasta secadores de alta capacidad, como un liofilizador; Actualmente hay una amplia gama de alimentos deshidratados, contribuyendo de forma relevante en el mercado alimenticio (Hernández, et al., 2017).

2.2 Importancia nutricional de los hongos comestibles

Los hongos representan una gran fuente de nutrientes para los consumidores, además de que algunos presentan propiedades medicinales. Estos tienen compuestos bioactivos, como los antioxidantes que tiene efecto antiinflamatorio. También en los hongos se pueden encontrar flavonoides como la naringenina, la rutina, la morina y resveratrol, los cuales con gran capacidad antioxidante desempeñan un papel de protección frente a patologías como cardiopatía isquémica, aterosclerosis, cáncer entre otras (Gaitán, 2023).

Los hongos aportan poca energía, después del agua los hidratos de carbono son el principal componente. Estos constituyen una gran fuente de fibra, provocando la sensación de saciedad, aumentando el volumen fecal, mejorando el tránsito intestinal y protegiendo frente al cáncer de colon y enfermedades cardiovasculares. También, los hongos tienen una buena rica fuente de aminoácidos esenciales, ya que a diferencia de los demás vegetales contiene todos los aminoácidos esenciales, a pesar de estar en bajas cantidades. Por otro lado, los hongos al tener un efecto saciante y de bajo contenido calórico lo convierten en un alimento ideal para dietas hipocalóricas (Moreiras, et al., 2013).

Algunas de las vitaminas presentes en los hongos son niacina (siendo uno de los alimentos con mayor contenido de esta vitamina), riboflavina y en menor proporción vitamina C y tiamina. Dentro de los minerales, contiene potasio, fósforo, selenio y hierro en cantidades considerables (Yadav & Wilson, 2021). Además, en estudios anteriores se ha demostrado que el consumo de *Agaricus bisporus* blanco (champiñón) en animales con diabetes tipo I produce que se retarde el desarrollo de la diabetes, reduciendo los síntomas, como el hambre, sed, pérdida de peso, entre otros (Moreiras, et al., 2013).

Por último, se tienen que por 100 g se champiñones se aportan 25 kcal, 1.4 g de proteínas, 2 g de fibra, 3.2 g de hidratos de carbono, 92 mg de fósforo, 376 mg de potasio, 0.8 µg de hierro, 7.2 µg de selenio, 4 mg de vitamina C, 4.6 mg de niacina, 0.41 mg de riboflavina, entre otros aportes nutricionales (Moreiras, et al., 2013).

2.3 Mercado de hongos comestibles

El mercado de hongos deshidratados ha ido en aumento en los últimos años, ya que se utilizan como un ingrediente de gran relevancia en muchas cocinas del mundo, participando en una amplia gama de recetas de alimentos, como condimento para snacks, como propios snacks de hongos, entre otros usos (Dehkordi, 2010).

En la actualidad, China es productor principal de cultivos de hongos comestibles, contemplando alrededor de 967 especies, los cuales consideran cerca del 50% de hongos comestibles cultivables; entre los cuales se encuentra el shiitake con más de 10 millones de

toneladas en 2020 producidos, el cual corresponde al hongo más producido en la industria China (Li, 2022).

Desde el año 2010 en adelante, la producción mundial de hongos aumento significativamente, como se observa en la Figura 1. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación Database (FAOSTAT) China es el principal producto de hongos, seguido por Estados Unidos y los Países Bajos con una producción mundial de 8,99 millones de toneladas. Se espera que la producción siga en aumento para los próximos años (Kumla, et al., 2020).

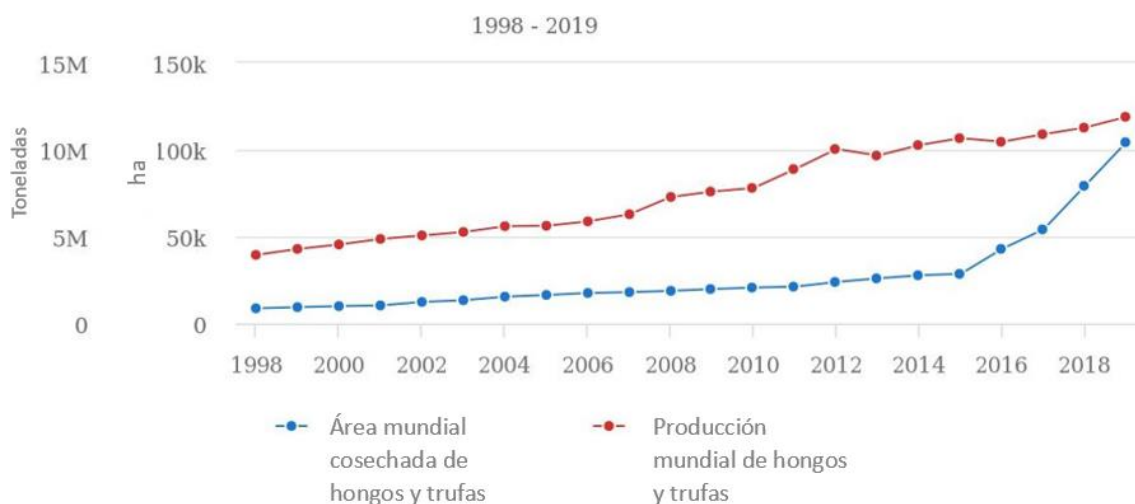


Figura 1. Producción mundial de hongos entre los años 1998 y 2019 (FAOSTAT, 2021)

China tiene un volumen de consumo per cápita de 1.16 kg, siendo el mayor productor de setas en Asia. Europa tiene el mayor consumo per cápita en el mundo; Holanda es el mayor consumidor con 11.62 kg, en segundo lugar, esta Irlanda con 6.10 kg, Bélgica con 4.46 kg, Dinamarca con 3.89 kg y España con 3.11 kg en 2007. En los últimos 20 años la producción de setas y trufas ha aumentado, el aumento anual del volumen de producción fue del 5.5% en 2019 (Tridge, 2021).

En la producción de hongos comestibles y trufas Asia tiene el primer lugar, con un 82.8% de la producción mundial en 2019, le siguen Europa, América, Oceanía y África con 12%, 4.5%, 0.4% y 0.3% respectivamente. La exportación de hongos de género *Agaricus* aumento en los últimos 5 años en un 21.6%, pasando de 982 millones de dólares en 2015 a 1.190 millones de dólares en 2019, en este último año los mayores exportadores fueron Polonia, Canadá, Holanda, Irlanda y Bielorrusia con un 33.7%, 19.2%, 13.7%, 9.5% y 3.9 % respectivamente (Tridge, 2021).

En el mercado de hongos deshidratados el valor de las exportaciones de setas secas y trufas ascendió a USD 1,84 mil millones en 2019, pese a que fue un año con un descenso del 30,7%. Los mayores exportadores fueron China con un 89,8% Vietnam con el 2,1%, Hong Kong con 0,9%, Francia con 0,8% e Italia con 0,7% (Tridge, 2021).

Por otra parte, en el mercado nacional del hongo *Agaricus bisorus* las exportaciones en conserva fueron de 192 kg en 2018 y 0 kg el 2019. Mientras que, las exportaciones de hongos deshidratados fueron de 68000 kg con un crecimiento del 23% en 2019. En las importaciones nacionales se tiene que las conservas fueron de 2600 kg en 2019 con un decrecimiento del 6%, y para los hongos deshidratados aproximadamente 8000 kg, con un decrecimiento del 39 % (ODEPA, 2019).

2.4 Tecnologías de secado

Para analizar el efecto combinado de ventana refractiva y microondas en la deshidratación de hongos comestibles se estudiarán las técnicas de ventana refractiva y microondas por separado y en conjunto para ser comparadas con otras tecnologías, con el fin de ver la factibilidad tecnologías combinadas. Como discernir entre que técnica de deshidratación utilizar en el área de procesamiento de alimentos depende de las características y propiedades físicas del alimento húmedo, así como del mecanismo de transferencia de calor y masa asociado al proceso.

● Ventana refractiva

Corresponde a una novedosa tecnología de cuarta generación para deshidratar alimentos patentada por Magoon y desarrollada por MCD Technologies Inc. El bajo consumo de agua y la alta retención de componentes volátiles en el alimento permite considerar a esta tecnología ecológica. Su funcionamiento se basa en la transferencia de calor desde agua a 85-95°C hacia el alimento que se encuentra inicialmente a temperatura ambiente, permitiendo que al trabajar a presión atmosférica y temperaturas relativamente bajas el alimento sufra el menor deterioro estructural y organoléptico posible. El alimento se encuentra sobre una película de tereftalato de polietileno (PET), más conocida como Mylar, el cuales de 0.2 a 1 mm de espesor (Mahanti, et al., 2021) y se encuentra en contacto con el baño termostático de acero inoxidable. En ventanas refractivas continuas el alimento es transportado por el mylar mediante una correa transportadora como se observa en la Figura 2. Mientras que, en ventanas refractivas por lotes, el alimento se deposita sobre el mylar y se retira cuando el tiempo de secado se completa, este sistema se observa en la Figura 3.

El mecanismo de transferencia de calor por el cual el agua transmite su energía térmica al alimento es por radiación y conducción, sin embargo, el aporte de esta último es el principal responsable del secado logrando que el agua libre del alimento se evapore desde la monocapa

y también que el agua libre en el interior se mueva a la superficie para evaporarse (Ochoa-Martínez, et al., 2012). El mylar sirve como soporte del producto y también como medio transparente a la radiación infrarroja, siendo este elemento el mejor adaptado para los sistemas de ventana refractiva por sus propiedades conductivas de calor (Raghavi, et al., 2018).

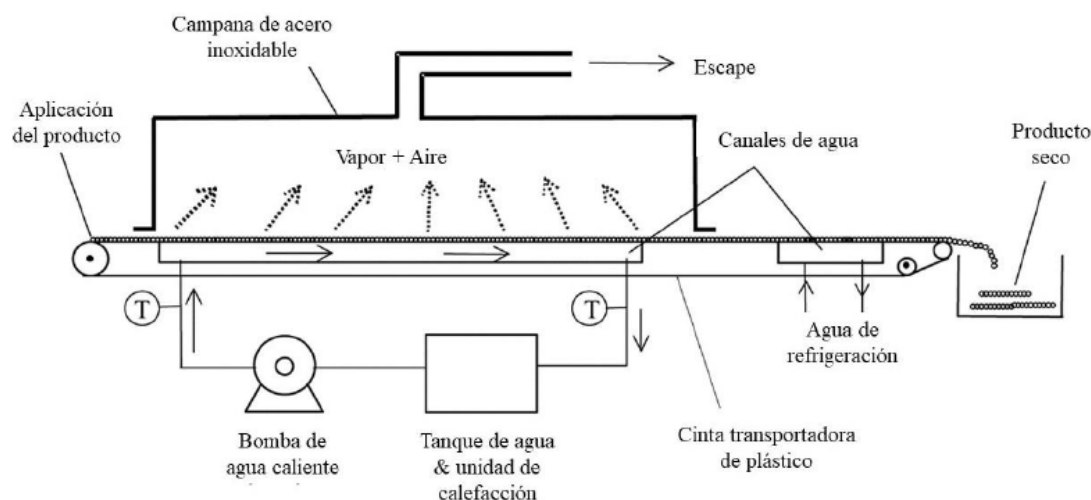


Figura 2. Esquema de ventana refractiva de operación continua (Nindo, et al., 2003).

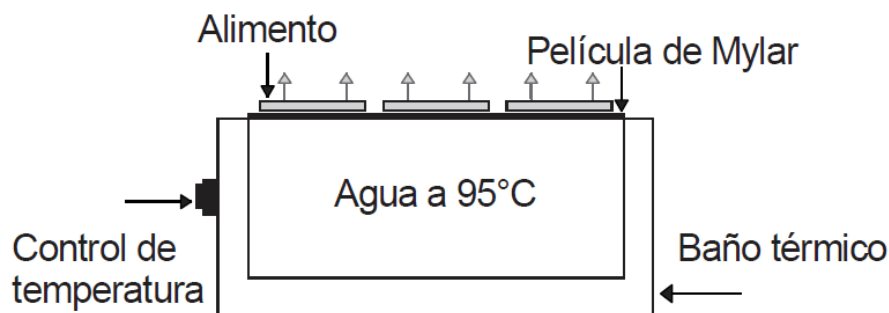


Figura 3. Esquema de ventana refractiva de operación por lotes.0.127

Para el secado de hongos o de cualquier alimento sólido se recomiendan espesores entre 0,2 a 1 mm para obtener tiempo de secado cortos y altas eficiencias energéticas (Ochoa-Martínez, et al., 2012). Por otra parte, a pesar de trabajar con agua a temperaturas cercanas a los 95-99°C, las láminas de producto sobre el mylar rondan entre los 60 a 70°C, debido a que el agua intercambia energía térmica con el ambiente por el mecanismo de convección (Nindo & Tang, 2007).

La fenomenología de la ventana refractiva tenemos que hay un fenómeno de transferencia de calor por convección en el agua, el mylar impide que el calor se disipe por evaporación, la película de refracta parte del calor y se regresa al agua, de esta manera se tienen solo los mecanismos de conducción y radiación que generan la evaporación del agua del alimento (Clarke, 2004). A través del mylar la energía térmica es transportada por el agua transmitiendo calor sensible al alimento, esta energía se extiende como una capa delgada sobre la película (mylar) por conducción y radiación.

La ventana refractiva al operar presión atmosférica y temperatura baja no afecta significativamente la estructura del alimento, siendo un método óptimo para secar alimentos líquidos, en polvos; se minimiza la degradación de los nutrientes, como polifenoles, vitaminas y flavonoides, además, esta tecnología es reconocida por mejorar el color y el sabor (Raghavi, et al., 2018).

También, cuenta con altas eficiencias energéticas, rodando el 70%. En la Tabla 1 se observan las eficiencias térmicas de distintas tecnologías, donde corresponde a la energía requerida para evaporar 1 Kg de agua libre del alimento sobre la energía solicitada en la operación del equipo. Por último, en la Tabla 2 se observan eficiencias energéticas del secado en ventana refractivas para diferentes alimentos (Nindo, et al., 2003).

Tabla 1. Comparación de eficiencia de distintos equipos (Menon, 2020).

Equipo de secado	Eficiencia térmica (%)
Inyección de vapor	33-46
Lecho fluidizado	38-58
Secador de banda	38-58
Secador rotatorio	25-50
Secador spray	20-51
Túnel de aire	38-42
VR (escala piloto)	28-48
VR (escala industrial)	52-70

Tabla 2. Eficiencia energética para distintos alimentos en ventana refractiva (Menon, 2020).

Muestra deshidratada	Eficiencia energética (%)
Puré de zanahorias	37.9 %
Puré de fresa	27.9 %
Juego de granada	31.56 %
Puré de calabaza	28.7 – 34.8 %

- Microondas:

El uso de esta tecnología viene desde hace décadas en diferentes aplicaciones del procesamiento de alimentos, como secado, pasteurización, esterilización, descongelación, entre otras. Esto debido a que permite lograr velocidades de calentamiento altas, reduciendo tiempos de secado y facilitando un calentamiento uniforme, además de tener un manejo seguro, simple.

El mecanismo de acción se basa en un calentamiento volumétrico propiciado por la radiación electromagnética, que debido a la capacidad de los alimentos de absorber la energía y convertirla en calor permite el secado de estos; las microondas son ondas electromagnéticas que varían tienen una frecuencia entre 300MHz y 300GHz, los equipos industriales de operan entre los 915MHz y 2,45GHz. (Datta & Anantheswaran, 2000).

La fenomenología de esta tecnología se basa en el calentamiento volumétrico, ya que esto genera vapores internos que permiten un gradiente de presión interno que fuerza la salida del agua hacia el exterior, evitando la contracción de los materiales alimenticios. Es de gran utilidad en el periodo de secado a velocidad descendente, ya que la difusión limita la velocidad, lo que puede ocasionar contracción estructural y una reducción de la humedad superficial. Por otra parte, la alta potencia de microondas reduce el tiempo de secado, debido a la transferencia de masa desde el centro a la superficie es más rápida al haber más calor generado (Chandrasekaran, et al., 2013).

La distribución uniforme del calor transferido al alimento depende de su geometría y tamaño, para materiales con forma de placa, esféricos o cilíndricos los puntos calientes se encuentran en el centro, pero puede hallarse también en zonas superficiales. (Chandrasekaran, et al., 2013).

El tiempo de secado es un factor para determinar la eficiencia energética del microondas; por sí solo no presenta altas eficiencias, es por ello que suele utilizarse en combinación con otra

tecnología. La eficiencia energética para distintos alimentos se puede se puede observar en la Tabla N°3.

Tabla 3. Eficiencias energéticas con microondas (Chandrasekaran, et al., 2013).

Muestra a secar	Eficiencia energética
Muestra de probiótico	27%
Manzanilla	8.25-13.07%
Rodajas de manzana	17.42-54.32%
Rodajas de kiwi	15.15-32.27%
Crisantemo	29.98-62.52%
Chips de durian	Valores SER de 5.6-9.66 KWh/kg
Champiñones	Valores SER de 2.51-6.00 KWh/kg
Fruta	Valores SER de 0.69-37.07 KWh/kg
Dientes de ajo	Valores SER de 7.27-17.27 KWh/kg

Se utilizó un resonador de borde recto (SER) de onda magnetostática sintonizable en frecuencia (MSW) fabricado con una película de granate de hierro itrio (YIG) como componente de frecuencia selectiva en un filtro resonante (Cismaru & R.Marcelli, 2006).

Las principales desventajas que presenta son quemaduras en bordes de alimento provocado por exceso de temperatura, la erradicación de los microorganismos no es completa durante la pasteurización y la heterogénea distribución de temperatura (Chandrasekaran, et al., 2013).

Una de las desventajas del secado por microondas es que el exceso de temperatura a lo largo de las esquinas o los bordes de los productos alimenticios provoca quemaduras y la producción de sabores extraños.

En estudios previos se evaluó el efecto de cinco métodos de cocción de cuatro hongos del género *Boletus* (*B. aereus*, *B. badius*, *B. pinophilus* y *B. edulis*); los métodos utilizados fueron cocer al vapor, cocinar a presión, freír, hervir y microondas. Se evaluó el contenido de compuestos fenólicos totales, perfiles de ácidos fenólicos y actividades antioxidantes (actividad eliminadora de $\text{OH}^\cdot$, reducción de potencia y actividad eliminadora de DPPH $^\cdot$). En

los resultados se obtuvo que en todos los métodos de cocción hubo una reducción del contenido de fenoles totales, sin embargo, la mejor retención de estos se obtuvo en microondas (Sun, et al., 2014).

- Efecto de la potencia del microondas en el proceso de secado

Como ya se mencionó anteriormente, el microondas por sí solo puede ocasionar daños en el alimento, ya que la distribución térmica heterogénea sobre las láminas es capaz de quemar partes superficiales. En el proceso de secado los parámetros más incidentes son la producción de energía y el tiempo de operación. Además, los contenedores pueden influir en la intensidad del campo del microondas y de esta manera afectar en la pérdida de peso y el tiempo de secado. (Chandrasekaran, et al., 2013). Un estudio sobre secado de zanahorias con microondas se encontró que a alta potencia se produce una rápida transferencia de masa desde el centro a la superficie debido a la generación mayor de calor (Wang & Xi, 2005).

En un estudio de los componentes fenólicos de papa agria al secarla en microondas se obtiene que al trabajar con potencias bajas el tiempo de operación aumenta y las pérdidas de agua disminuyen al tener velocidades de secado lentas. La reducción de pérdida de agua evita daños térmicos de los componentes nutricionales debido a su alta capacidad térmica. Se concluyó que a 500W los compuestos fenólicos tienen una retención en un buen nivel en las muestras de papas (Chandrasekaran, et al., 2013).

En otra investigación se deshidrata perejil en microondas se encontró que el tiempo de secado disminuye con un aumento en la potencia de salida de microondas. Las hojas de perejil secadas en microondas retuvieron el color y el cambio en el nivel de potencia no afectó a los parámetros de color (Soysal, 2004).

Hallar la combinación óptima para el secado en microondas acoplado a otra tecnología es muy relevante y necesario determinar la potencia del microondas ideal para el tipo de secado (Zhang, et al., 2006).

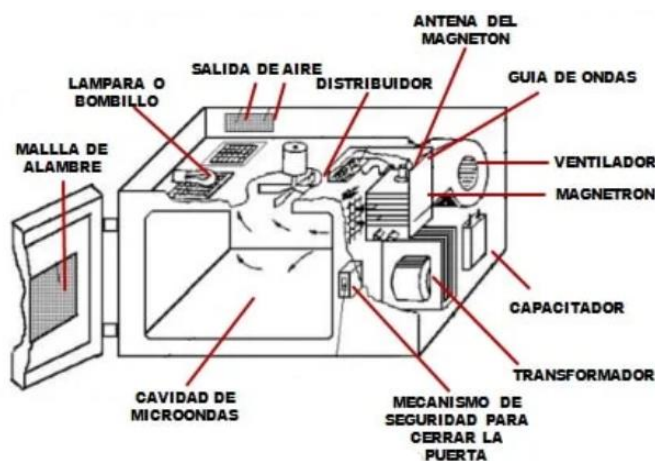


Figura 4. Esquema de microondas

- Sistemas de secado híbridos:

Para lograr mayores eficiencias energéticas y alcanzar mejores estándares en la calidad final del producto se utilizan combinaciones de tecnologías de secado.

Estas combinaciones brindan mejores eficiencias y superan inconvenientes como velocidades de secado bajas y calidades inferiores a los estándares (Menon, et al., 2020).

Las distintas eficiencias de tecnologías combinadas se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Eficiencias energéticas para tecnologías híbridas (Menon, et al., 2020)

Tipos de secado	Muestra a secar	Eficiencia energética
Aire caliente + energía solar	Tomate	17 - 29%
Aire caliente + Secador rotatorio	Pez plateado salado	17 - 44%
Bomba de calor + secado térmico fotovoltaico	Azafrán	10.8 - 72%
Calor por biomasa + solar	Nuez de anacardo	5.08%
Gas + energía solar	Cebolla, jengibre, repollo	42.79%
Microondas + Secado infrarrojo convectivo	Pimienta verde	13%
Secado convencional + microondas	Guindas	8.77-10.03%
Solar + estante termal	Cúrcuma negra	12%
Solar + secado con biomasa	Cacahuete, chips de ñame	0.23-16.04%
Túnel + energía fotovoltaica	Hojas de menta	16.32%
Secado a vacío + Microondas	Cultivo probiótico	27%

La combinación de tecnologías permite optimizar tiempo de secado y con ello aumentar la eficiencia energética, pero también incide en la calidad del producto, ya que al minimizar los

tiempos de exposición del alimento a alta temperatura permite retener en mayor cantidad compuestos fenólicos, antioxidantes, vitaminas, entre otros, debido a que son termolábiles. (Zhang, et al., 2006) (Torres, et al., 2017).

2.5 Análisis matemático del proceso de secado en alimentos

El análisis de las curvas de secado se hace comúnmente con la segunda ley de Fick para representar fenomenológicamente los procesos de deshidratación de alimentos, no obstante, este modelo no siempre se adecua de la mejor forma al comportamiento de los tejidos vivos, ya que tiene supuestos que no son adecuados para los alimentos, como suponer que no existe contracción estructural, cambios de volumen, pérdida de humedad, desnaturalización de proteínas, entre otros comportamientos debido a que los movimientos del agua dentro del alimento pueden tener distintas velocidades (Franco, et al., 2019). Por lo que, se hace uso de un segundo modelo, el modelo de difusión anómalo; que utiliza el cálculo fraccional para representar fenomenológicamente los procesos de secado con difusión anómala. (Simpson, et al., 2017).

El modelo de difusión anómala contiene un parámetro denominado “orden fraccionario” α , que puede estar entre 0 y 1 cuando el proceso es subdifusivo, es decir, el movimiento de agua es más lento que en Fick ($\alpha = 1$) o puede ser mayor a 1 cuando el proceso es superdifusivo. Este nuevo parámetro que no contemplo Fick tiene relación con la microestructura del material alimenticio. (Simpson, et al., 2017).

- Segunda ley de Fick:

La ecuación 1 que modela la segunda Ley de Fick, que supone una placa infinita se representa por:

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

Donde, MR es la tasa de humedad, X(t) es la humedad en base seca (Kg agua/Kg solido seco) en el tiempo, Xe es la humedad en base seca que alcanza el alimento en el equilibrio, X0 es la humedad en base seca inicial del alimento, Deff es el coeficiente de difusión efectivo (m²/s), t es el tiempo de secado (s) y L corresponde al espesor de la lámina de alimento (m).

Cuando se representa un secado a tiempo largo (MR < 0,6) la ecuación simplificada se puede escribir como en la ecuación 2.

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

- Modelo de difusión anómalo:

Este modelo basado en el cálculo fraccional se representa la siguiente ecuación 3.

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

Donde, X es una humedad en base seca (Kg de agua/Kg solido seco), t el tiempo (s^α), D_{eff} el coeficiente de difusión efectivo (m^β/s^α), α se relaciona con los tiempos de espera anómalo entre saltos y β se relación con las longitudes de saltos anómalos. Si el termino β de las matrices de alimentos converge a 2 y el tiempo mantiene su orden fraccional el modelo se representa la siguiente ecuación 4.

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

Donde, E_α es la función de Mittag-Leffler (Simpson, et al., 2017).

Si la función de Mittag-Leffler convergue a la función exponencial y α converge a la unidad, la representación del modelo de difusión anómalo para tiempo largo que representado por la ecuación 5.

$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} e^{\left(-D_{eff} \left(\frac{(\pi)}{2L} \right)^2 t^\alpha \right)} \quad (5)$$

En deshidratación de hongos se tiene que para un caso analizado de un sistema hibrido de microondas con aire caliente convectivo, usando rodajas de hongos de 2.5, 5 y 10 mm de espesor, una potencia del microondas de 120W, una temperatura del aire caliente de 60°C se obtienen coeficientes de difusión efectiva promedio para los espesores entre $1,25 \cdot 10^{-9}$ y $1,79 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. (Das, 2017).

2.6 Calidad en productos deshidratados y efectos del tipo de secado.

2.6.1 Capacidad antioxidante

Los hongos tienen distintos compuestos fenólicos que poseen capacidad antioxidante, entre los que encontramos flavonoides y polifenoles, los cuales son los principales compuestos que

les otorgan la capacidad antioxidante a los champiñones; también tienen un contenido de carotenoides, específicamente β -caroteno y licopeno, que son aportan con la vitamina A, la cual es importante por su efecto antioxidante, inflamatorio y por otorgar protección celular. Además, los hongos contienen vitaminas C y E que aportan capacidad antioxidante (Robaszkiewicz, et al., 2010).

El hongo *Agaricus bisporus* presenta vigorosas propiedades antioxidantes, conteniendo compuestos como la ergotioneina, catequina, miricetia, entre otros; también, contiene la vitamina tocoferol, que actúa como antioxidante. Este hongo es uno o el que más antioxidantes contiene, siendo útil en la prevención de distintas enfermedades, como el Alzheimer (Robaszkiewicz, et al., 2010).

En estudios previos se comprobó que el hongo *Agaricus bisporus* deshidratado con y sin cascara presenta diferencias estadísticamente significativas en la capacidad antioxidante; además, existen diferencias entre las partes del hongo (Robaszkiewicz, et al., 2010). En las Tablas 5 y 6 se observa el contenido de la capacidad antioxidante de flavonoides y equivalente en Trolox para extracto de *Agaricus bisporus* deshidratado, donde se realizó una extracción metanólica.

Tabla 5. Capacidad antioxidante de flavonoides en extracto de hongo *Agaricus bisporus* deshidratado.

Muestras	Capacidad antioxidante de flavonoides (μg equivalente de flavonoide/mg muestra seca)
Sombrero de <i>Agaricus bisporus</i> con piel	0.50 ± 0.11
Tallo de <i>Agaricus bisporus</i> con piel	0.26 ± 0.02
Sombrero de <i>Agaricus bisporus</i> sin piel	0.41 ± 0.01
Tallo de <i>Agaricus bisporus</i> sin piel	0.17 ± 0.04

Tabla 6. Capacidad antioxidante equivalente en Trolox en extracto de hongo Agaricus bisporus deshidratado.

Muestras	Capacidad antioxidante equivalente en Trolox($\mu\text{mol Trolox/g muestra seca}$)
Sombrero de Agaricus bisporus con piel	9.36 ± 2.16
Tallo de Agaricus bisporus con piel	6.16 ± 1.04
Sombrero de Agaricus bisporus sin piel	8.48 ± 1.13
Tallo de Agaricus bisporus sin piel	4.71 ± 1.81

En técnicas de secado de alimentos las altas temperaturas tienen un efecto negativo en la retención de antioxidantes (Torres, et al., 2017). En ventana refractiva los tiempos de secado son reducidos, pero trabajar a altas temperaturas puede provocar una pérdida significativa en la capacidad antioxidante, por lo que un optimizar la retención de estos compuestos de interés el secado asistido por microondas es una opción para considerar. La energía propiciada por el microondas es radiación no ionizante que solamente causa movimiento molecular por migración de iones y rotación de dipolos (Torres, et al., 2017).

En el secado en microondas, existe una significativa reducción de los compuestos que otorgan capacidad antioxidante, reduciéndose esta última en un 20 a un 40% durante el secado (Sun, et al., 2014).

Estudios previos indican que para manzanas hay una reducción aproximadamente de un 60% en la capacidad antioxidante mediante el secado en ventana refractiva a 90°C (Núñez, et al, 2023). En otros estudios se determinó que para el secado de papa en ventana refractiva a 95°C hay una reducción de la capacidad antioxidante en un 16% aproximadamente (Nayak, et al., 2011). Cabe destacar que no existen datos en la literatura sobre la reducción de la capacidad antioxidante de Agaricus bisporus en secado en ventana refractiva.

Para la medición de la capacidad antioxidante de los alimentos existe el método llamado DPPH que se muestra a continuación.

- Método de captación de radicales (DPPH):

Para la determinación de la concentración de la capacidad antioxidantes se utiliza la técnica del DPPH, donde para lograr la evaluación correcta lo que se evalúa constantemente es la concentración del DPPH en los medios de reacción.

Este método de decoloración del catión radical DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazilo) es

comúnmente utilizados para la medición de la capacidad antioxidante de una sustancia. El DPPH es un radical estable, que presenta color púrpura oscuro en solución alcohólica y con un máximo de absorción a los 517nm. Este ensayo se basa en la determinación inicial de la concentración DPPH y la concentración una vez que se ha adicionado una sustancia. Una disminución en la concentración de DPPH se relaciona con una disminución del color púrpura. En la Figura 5 se observa la transferencia de electrones del compuesto antioxidante (Guija, et al., 2015).

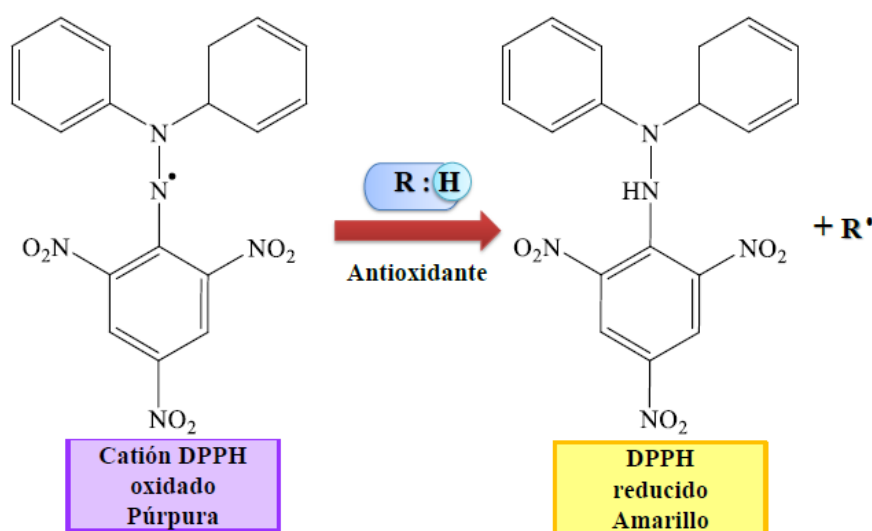
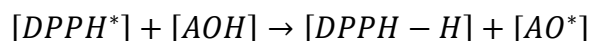


Figura 5 Mecanismo de reacción de decoloración DPPH.

La reacción de este proceso es de pseudo primer orden, mediante estudios cinéticos midiendo la disminución de la absorbancia en función del tiempo (Guija, et al., 2015).

En primera instancia la medición permite observar una primera fase muy rápida, seguida por una reacción lenta, que podría originarse debido a un proceso de dimerización de los productos de la reacción.

La reacción entre el DPPH y un antioxidante se escribe de la siguiente manera:



Por lo tanto, las condiciones de ensayo en que se mide la capacidad antioxidante se describen por la siguiente expresión.

$$\frac{d[\text{DPPH}^*]}{dt} = k_{obs}[\text{DPPH}^*]_t$$

2.6.2 Contenido de polifenoles

Los hongos tienen un abundante contenido de polifenoles y carotenoides, los que son eficientes antioxidantes en sistemas biológicos, donde se ha reportado polifenoles interfiriendo con la progresión o el inicio de un cáncer. Además, se menciona que los polifenoles actuando como antienviejecimiento, antiinflamatorio y como protección de enfermedades cardiovasculares (Robaszkiewicz, et al., 2010). También, son importantes como antioxidantes que eliminan especies reactivas de oxígeno (ROS) en la dieta humana (Bernaert, et al., 2019). Cabe destacar que estos compuestos son termolábiles, es decir, el uso de altas temperaturas provoca su degradación (Torres, et al., 2017), por lo que optimizar la temperatura y tiempo de secado es de relevancia para minimizar la pérdida de estos compuestos.

En estudios previos se indica que el hongo *Agaricus bisporus* deshidratado con y sin cascara presenta diferencias estadísticamente significativas en el contenido de polifenoles totales; además, existen diferencias entre las partes del hongo (Robaszkiewicz, et al., 2010). En la Tabla 7 se observa el contenido de polifenoles totales para extracto de *Agaricus bisporus* deshidratado, donde se realizó una extracción metanólica.

Tabla 7. Contenido de polifenoles totales en extracto de hongo *Agaricus bisporus* deshidratado.

Muestras	Contenido de polifenoles totales (μg de ácido gálico equivalente/mg muestra seca)
Sombrero de <i>Agaricus bisporus</i> con piel	2.04 ± 0.13
Tallo de <i>Agaricus bisporus</i> con piel	1.64 ± 0.89
Sombrero de <i>Agaricus bisporus</i> sin piel	1.90 ± 0.09
Tallo de <i>Agaricus bisporus</i> sin piel	1.01 ± 0.20

En investigaciones anteriores se menciona que el contenido de polifenoles totales en jugo de granada es mayor en ventana refractiva, que en secador solar (Baeghbali & Niakosauri, 2018). En rodajas de tomate rojo al comparar el contenido de fenol en muestras deshidratadas y frescas, se obtiene que la ventana refractiva tiene un efecto mínimo en la degradación de los compuestos fenólicos, ya que no se presentan diferencias estadísticamente significativas (Nayak, et al., 2011). En contraste, el secado en ventana refractiva de manzanas Granny Smith afecta negativamente el contenido de polifenoles, en aproximadamente un 25% (Quitral, et al., 2014).

Para la medición del contenido de polifenoles totales se utiliza el método de Folin-Ciocalteu que se describe a continuación:

- Ensayo de Folin-Ciocalteu:

El ensayo de Folin-Ciocalteu da una estimación del contenido de fenoles totales para la mayoría de las matrices vegetales. Basandose en la capacidad de los fenoles para reaccionar con agentes oxidantes. El reactivo de Folin-Ciocalteu contiene sales de molibdeno y tungsteno que reaccionan fenol formando complejos fosfomolibdico-fosfotungstico. En una reacción oxido-reducción los complejos fosfomolibdico-fosfotungstico se reducen convirtiéndose en óxidos cromógenos de color azul intenso de tungsteno (W_8O_{23}) y molibdeno (Mo_8O_{23}), mediante una transferencia de electrones en pH básico. Este color azul intenso es proporcional al número de grupos hidróxilo de la molécula. Luego determinar esta coloración se utiliza un espectrofotómetro a una longitud de onda de 765nm (Lacueva, et al., 2010). En la Figura 6 se observa el efecto del pH en la reacción con F-C.

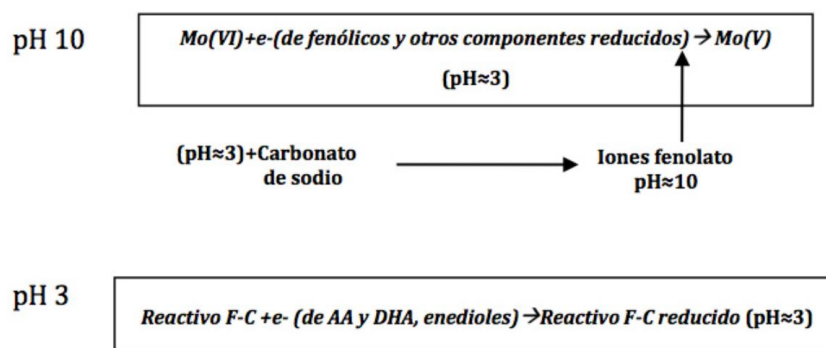


Figura 6 Efecto de pH en la reacción con Folin-Ciocalteu.

No obstante, el método experimenta interferencias debido a la presencia de diferentes sustancias, azúcares, aminos aromáticos, dióxido de azufre, ácido ascórbico y otros enedíoles y reductonas y hierro (II), por lo tanto, se debe realizar una corrección que considere las sustancias interferentes con la finalidad de obtener exclusivamente la concentración de fenoles totales (Lacueva, et al., 2010) (Prior, et al., 2005).

En los alimentos, específicamente en frutas y hortalizas mínimamente procesadas donde se incorpora ácido ascórbico como agente oxidante el ácido dehidroascórbico (DHA), el ácido ascórbico (AA) y los azúcares reductores glucosa y fructosa tienen el mayor impacto obstaculizando la precisión del ensayo (La cueva, et al., 2010).

Para minimizar la interferencia de AA y DHA (vitamina C) e han desarrollado algunos factores de corrección utilizando ensayos específicos para esta vitamina y métodos de

extracción que eliminan la mayoría de la vitamina C (Prior, et al., 2005). Para mejorar la especificidad del ensayo de Folin-Ciocalteu se han planteado diferentes metodologías, dentro de los cuales se encuentra el cálculo de la corrección del valor de fenoles totales sustrayendo la actividad reductora del ácido ascórbico (AA) (Sánchez, et al., 2010).

El DHA es un enediol y por lo tanto también produce color azul en condiciones ácidas durante la reacción de Folin-Ciocalteu, este es el primer producto de oxidación del ácido ascórbico y está naturalmente presente en frutas y hortalizas (Sánchez, et al., 2013)

2.7 Propiedades físicas

2.7.1 Cambio de color

Para el consumidor es muy relevante el aspecto del producto, por lo que el color de este es un parámetro que afectara en su decisión para elegir el producto. Una investigación previa compara el secado de pure de zanahoria en cuatro distintas tecnologías, ventana refractiva (VR), SD (secador solar), DD (secador de tambor) y FD (liofilizador). Se observó una diferencia estadísticamente significativa en el valor de L^* en las muestras de las diferentes tecnologías, sin embargo, entre FD y VR no se observaron diferencias relevantes. El valor más alto de L^* se obtuvo en la muestra FD en comparación con las otras tecnologías de secado, donde en DD y VR las muestras resultaron ser las más oscuras. Por otra parte, los valores más altos de L^* , a^* y b^* de la muestra VR implican colores amarillos y rojo más saturados e intensos, lo que puede resultar atractivo para el consumidor. En el caso de la adición de aditivos, las muestras deshidratadas en FD y VR resultaron con mayor luminosidad en intensidad en el color que las muestras frescas con y sin aditivos. En SD con maltodextrina como aditivo se observa una baja saturación de color en las muestras, por lo que estas muestras son más pálidas que las muestras frescas (Abonyi, et al., 2002).

En la Tabla 8 se observan los resultados de los valores de L , a y b para distintos métodos de secado.

Tabla 8. Parámetros de color en diferentes alimentos. (Morales, 2013)

Producto	Método de secado	Condición de T (°C)	Parámetros de color		
			L	a	b
Rodajas de espárragos	Fresco		40.3	-3.2	11.8
	VR	95	18.3	-4.5	15.6
	Liofilización	20	37.7	-4.9	20.7
	Aire caliente	50	24.8	-2.6	20.6
Puré de zanahoria	Fresco		54.3	28.7	44.0
	VR	95	72.0	34.1	45.1
	Liofilización	20	77.6	27.1	44.1
Puré de fresa	Fresco		36.1	25.6	19.8
	VR	95	53.8	27.9	16.9
	Liofilización	20	53.8	30.0	18.8
Rodajas de papa roja	Fresco		19.3	-	-
	VR	95	55.3	-	-
	Liofilización	20	54.0	-	-

En otros estudios, se comprobó que el color del producto tiene una dependencia del grosor de la rodaja (1 y 2 mm), del tiempo de secado, la temperatura y la tecnología de secado (Ochoa-Martínez, et al., 2012).

En el secado en microondas sin una tecnología complementaria se ven altamente afectados los parámetros de color L, a y b, debido a que con el aumento de la potencia las muestras se intensifican los colores amarillo y rojo, lo que implica un crecimiento de los parámetros a y b (Chandrasekaran, et al., 2013). Una opción para complementar al microondas es la VR, ya que para el secado de la mayoría de los alimentos preserva en gran medida el color de la muestra fresca.

2.7.2 Actividad de agua

La actividad de agua (a_w) está relacionada con el agua superficial que tiene el alimento y la presión de vapor del agua en el aire. El agua que no está ligada a la estructura interna del alimento queda disponible para uso de los microorganismos o reacciones enzimáticas internas. Este parámetro se describe matemáticamente por la ecuación 6.

$$a_w = \frac{\text{Presión de vapor del agua libre en el alimento}}{\text{Presión de vapor del agua en el aire}} \quad (6)$$

Para la preservación de los alimentos la actividad del agua muy relevante, debido a que una actividad de agua baja (cerca de 0.4) asegura que los microorganismos no proliferaran en el alimento, evitando la degradación temprana de este.

El grosor de las láminas de producto tiene una repercusión en la a_w , como ejemplo a esto se tiene un estudio sobre secado de láminas de mango, donde se obtuvo que la a_w de estas es significativamente dependiente de la tecnología utilizada para la deshidratación y del espesor de la lámina. Investigaciones anteriores obtienen que el contenido de humedad (MC) y a_w de jugo de açaí en un secado por liofilización, VR y secado convencional durante el proceso y después de 3 meses almacenado. La a_w de la muestra deshidratada con VR fue más alta que el de las otras muestras; además, esta tendencia continua durante el almacenamiento. El MC de las muestras presenta la misma tendencia que la a_w . En contraste, independiente del resultado de actividad de agua la mayor capacidad de absorción de agua ocurre en las muestras secadas convencionalmente, en comparación con las muestras liofilizadas y secadas en VR (Ochoa-Martínez, et al, 2012).

En estudios previos al deshidratar láminas de papaya de 2, 3 y 4 mm de espesor se obtiene que en las muestras más delgadas presentan una actividad de agua menor que las muestras más gruesas, ya que luego de 60 min de secado la a_w de láminas de 2 mm fue bajo 0.6, mientras que para las de 4 mm fue sobre 0.6 (Ocoro-Zamora & Ayala-Aponte, 2013).

Por lo tanto, estudios previos indican que la a_w del producto final depende principalmente del espesor de la muestra, el tiempo de secado y la temperatura del agua. y a su vez, la calidad del producto depende del contenido de humedad del alimento deshidratado. Por lo que, para optimizar la calidad y vida útil del producto final se deben optimizar los parámetros de funcionamiento del proceso de secado (Caparino, et al., 2013).

En la liofilización, el agua presente en la muestra se convierte en hielo y luego por sublimación se convierte en vapor sin atravesar la fase líquida, lo que permite que la estructura del alimento minimice sus alteraciones; las capacidades de absorción de agua de las muestras liofilizadas fueron más altas que las muestras VR. Finalmente, en el secado por tambor rotatorio se necesitan temperaturas más altas para procesar alimentos con alto

contenido de azúcar para que el producto se torne más higroscópico (Caparino, et al., 2013).

2.7.3 Textura

En los alimentos la textura se define como “todos los atributos reológicos y estructurales (geométricos y superficiales) del producto perceptibles por el medio de receptores mecánicos, táctiles, y sea el caso, visuales y auditivos” (Lawless & Heymann, 2010).

Para evaluar la textura del alimento fresco y deshidratado se realizan diversos ensayos en los que se evalúan distintas cualidades, como la dureza, cohesividad, elasticidad y masticabilidad.

Los diferentes métodos mecánicos para medir la textura del alimento dependen del sector industrial al que pertenece el alimento y al tipo de producto. Un ensayo utilizado es el de corte, donde se utilizan cables o cuchillos para cortar a través de un alimento y medir el esfuerzo máximo que se desarrolla o el tiempo necesario para cortar; otro ensayo utilizado es el de punción, que mide la fuerza necesaria para empujar una sonda a través de un alimento a profundidad específica o a una distancia de penetración lograda mediante la aplicación de una fuerza (Chen & Opara, 2013). Comúnmente el ensayo realizado en láminas de alimento deshidratado es el de dureza, la cual se define como, “la fuerza necesaria para lograr una deformación determinada”, y se determina como la máxima fuerza durante el primer ciclo de compresión (Carrión, 2017). Para alimentos frescos, los requerimientos en términos de manipulación, almacenamiento y aceptabilidad dependen de propiedades de la textura, como la firmeza (Chen & Opara, 2013).

Estudios previos indican que para un ensayo de doble compresión al 50% de deformación, se obtiene una dureza de 242 ± 27 N para la materia prima fresca, mientras que para las muestras liofilizadas se menciona que la dureza es de 25 ± 8 N (Carrión, 2017).

2.8 Consumo y eficiencia energética en la industria

El secado en ventana refractiva es comparado en diversos estudios con distintas técnicas de deshidratación de alimentos, analizando la eficiencia energética y térmica. La eficiencia del secado por VR se calcula acumulando el equilibrio de vapor y calor a través del agua de proceso y la temperatura del producto en varios puntos. El agua de la secadora fluye de regreso al depósito y se recalienta en lugar de desperdiciarse durante el proceso de secado, por lo que, en comparación con los secadores convencionales, VR se destaca por poseer una eficiencia térmica muy buena (Nindo & Tang, 2007).

En una investigación, el secado de jugo de granada tiene la mayor eficiencia energética en VR, con un 31.56%; en segundo lugar, está el secado por pulverización, con un 12.92% y por último, la liofilización, con un 1.12% (Spoelstra, et al., 2017). Otro estudio calculó la

eficiencia energética global para zanahoria y fresas secadas mediante secado con VR, dando como resultado 37.9% y 27.9% respectivamente (Abonyi, etl a., 2002).

La eficiencia operativa de la ventana refractiva es similar con los secadores por atomización y de tambor. En contraste, es menor que la eficiencia del secador rotatorio (Nindo & Tang, 2007).

En la Tabla 9 se comparan los consumos energéticos de distintas tecnologías.

Tabla 9. Comparación de consumo de energía de diferentes métodos de secado.

Equipo de secado	Consumo típico de energía kJ/kg de agua	Energía de evaporación kJ/kg de agua
Inyección de vapor	5000-7000	2370
Lecho fluidizado	4000-6000	2400
Secador de banda	4000-6000	2400
Secador rotatorio	4600-9200	2588
Secador spray	4500-11500	2840
Túnel de aire	5000-6000	2300
VR (escala industrial)	4700-8100	3904

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3. Materiales y métodos

3.1 Materiales

- Caracterización y preparación de la materia prima

Se usa *Agaricus bisporus* cepa blanca, conocido como champiñón. Se utiliza la marca Abrantes obtenidos supermercados Santa Isabel, Valparaíso. Se almacenan a 2 °C en el laboratorio de alimentos y bioprocesos de la Universidad Técnica Federico Santa María y se utilizan dentro de los 2 días, luego de abrir el envase. Los champiñones se lavan con agua destilada, se les retira el tallo para luego cortarlos en láminas de 3 ± 0.1 mm de espesor y 30 ± 1 mm de diámetro. Solo se usa el sombrero y no el tallo del champiñón debido a que el primero es quien presenta mayor contenido de nutrientes, como polifenoles, flavonoides, entre otros compuestos antioxidantes (Robaszkiewicz, et al., 2010). Luego, se les hace un pretratamiento para hacer una inactivación enzimática, para ello se les hace un escaldado, donde se introducen 1 min en agua destilada a 90°C y luego se introducen 1 min en agua destilada a 4°C (Lespinar, et al., 2013). Por otra parte, para hacer pulpa las láminas pretratadas son machacadas en un mortero.

Para la caracterización de la materia prima se mide la actividad de agua, humedad, color, polifenoles totales, capacidad antioxidante, textura y sólidos solubles para comparar con los valores luego de la deshidratación; en la siguiente sección se explican los métodos para cada parámetro a medir. Al caracterizar la materia prima, todos los valores fueron obtenidos con un 95% de confianza mediante el software STATGRAPHIC Centurion XVI.



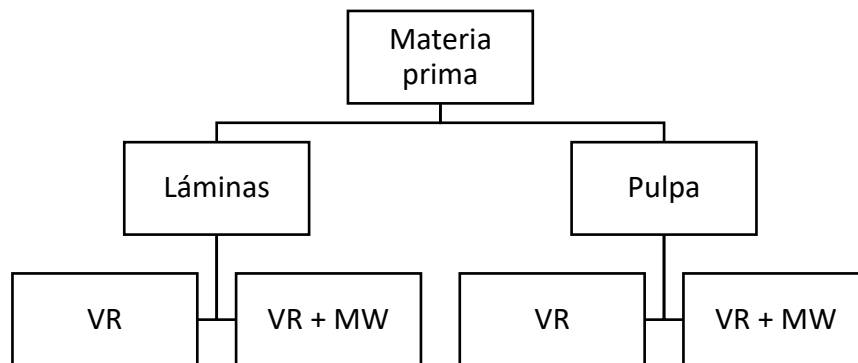
Figura 7. Materia prima: Hongo *Agaricus bisporus* cepa blanca(champiñón).



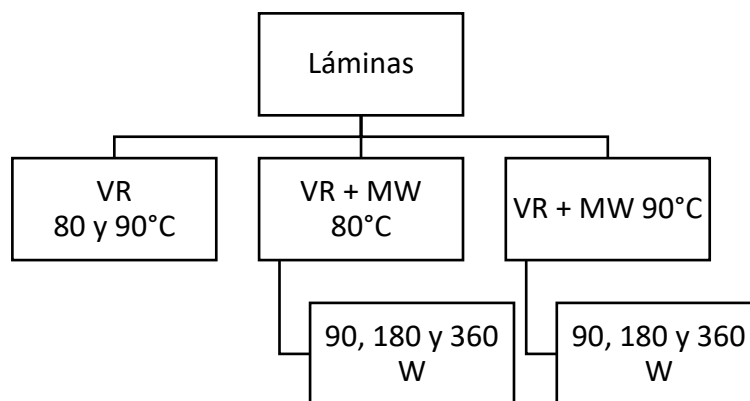
Figura 8. Muestras de láminas de hongos

3.2 Métodos

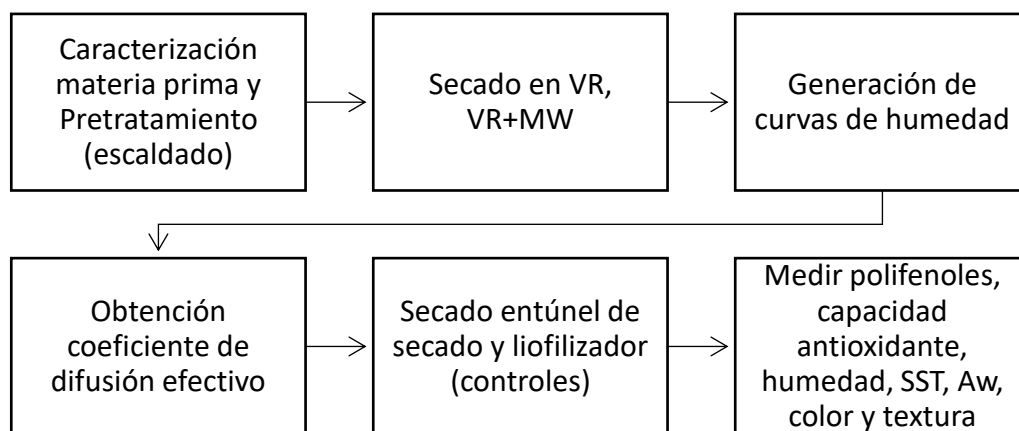
- Procedimiento experimental para determinar formato de la materia prima



- Procedimiento experimental para determinar la cinética de secado



- Metodología de trabajo



- Secado en ventana refractiva (VR)

Consiste en un baño termorregulado de 60 L de capacidad que se llena con agua destilada a dos temperaturas, a 90 ± 1.0 °C y 95 ± 1.0 °C, donde esta última es la temperatura máxima de la ventana refractiva (MERMMERT, modelo WNB22, Alemania). Además, se utiliza una lámina como película de plástico (MYLAR, tereftalato de polietileno) de 0.1 mm de espesor y dimensiones de 55 x 32 cm que se puso en contacto con el agua del baño termorregulado. Se mantendrá una distancia de al menos 4 cm entre los límites del baño y el MYLAR para purgar las burbujas de aire producidas como resultado del calentamiento (Franco, et al., 2019). Las muestras se colocan en el MYLAR sin girarlas durante el experimento y en cada momento de muestreo se extrae una muestra para medir la masa y la actividad de agua.

En el caso de la masa se sacaron muestras cada 5 min en duplicado, se utilizó una balanza analítica (Precisa modelo XB 620M) con el fin de obtener la curva de secado a lo largo del tiempo para la evaluación de cinética de secado. Para la medición de actividad de agua se sacaron las primeras 2 muestras en duplicado cada 10 min, y luego cada 5 min para obtener la curva y verificar el tiempo necesario para que el producto tenga un $a_w \leq 0.4$.

La humedad relativa del laboratorio fue medida a través del instrumento termohigrómetro marca ISOLAB modelo 060.030.001, con una precisión de $\pm 1\%$. Se obtiene una humedad relativa del laboratorio de $52 \pm 8\%$.

En la Figura_ se observa una representación esquemática de la configuración de la ventana refractiva.

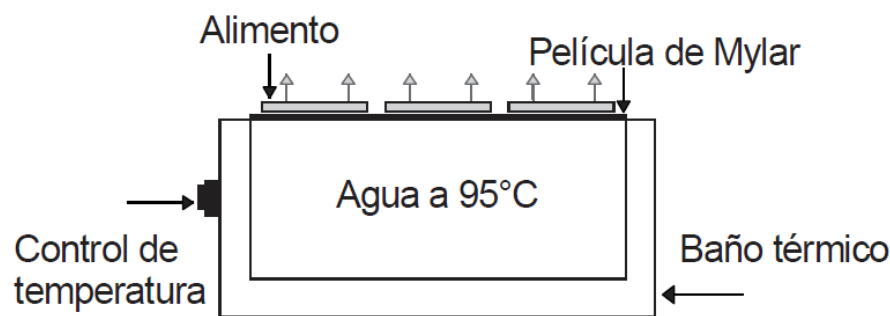


Figura 9. Esquema de ventana refractiva



Figura 10. Ventana refractiva MERMMERT, modelo WNB22, Alemania

- **Secado en ventana refractiva (VR) acoplada a microondas (MW)**

Para la combinación de ambas tecnologías la parte de la ventana refractiva se realizará de la misma manera que como se explicó anteriormente, mediante un baño termostático compuesto por un pote de vidrio lleno de agua destilada que lleva una película de plástico MYLAR de 12 x 12 cm. Esta configuración se introducirá a un microondas (Bosch Hmt72G450, China) para combinar las temperaturas de 80 y 90 °C con las potencias de 90, 180 y 360W, ya que potencias mayores pueden dañar el alimento (Chandrasekaran, et al., 2013). Para optimizar el secado a potencias altas, se agrega sal al agua destilada para disminuir su punto de ebullición, saturando el agua en un 40%. Para el secado de pulpa de champiñones se colocan 9 muestras en el MYLAR de 30 mm de diámetro y 3 mm de espesor.

Para encontrar las potencias óptimas se realizó una curva de temperatura v/s tiempo de agua destilada midiendo la temperatura con un termómetro infrarrojo digital laser (GM 320). Al obtener las potencias se realizó el calentamiento a 80 y 90°C extrayendo muestras cada 5 min en duplicado para la medición de masa con el objetivo de obtener la curva de secado y cada 10 min en duplicado las primeras 2 muestras, y luego cada 5 min para la medición de actividad de agua, con el fin de obtener el tiempo final de secado a una $a_w \leq 0.4$.

Este sistema híbrido tiene menor área de secado que la ventana refractiva, por lo que fueron necesarias mayor cantidad de secados para los muestreos.

Para un control del proceso se mide la temperatura del agua, las mediciones se realizan debajo del mylar, pues ahí es donde el agua tiene una temperatura similar a la del alimento, ya que la temperatura del agua no es homogénea en todo el volumen de agua. Se utiliza una termocupla para la medición.



Figura 11. Sistema híbrido en el laboratorio Bosch Hmt72G450, China

- Secado con aire caliente (proceso convencional)

Para el estudio con secado con aire caliente, se utiliza una estufa convectiva (Memmert UFB-400, Alemania). La materia prima después de hacerle el mismo pretratamiento que para VR y MW, se secará a una temperatura de 70°C. Este secado tiene como objetivo ser un parámetro de control de la calidad del producto para los secados en ventana refractiva acoplada a microondas, ya que simula el proceso convencional del secado de alimentos en la industria. Por lo tanto, solo se extraerán muestras en duplicado cada 10 min con el fin de obtener una $a_w \leq 0.4$ para cumplir con la misma condición que los secados en VR y MW.



Figura 12. Estufa convectiva Memmert UFB-400, Alemania.

- Secado en liofilizador

Para deshidratar los champiñones en el liofilizador (Christ Alpha 2-4 LCSplus, Alemania) las láminas ya pretratadas se congelan a -87°C por 24 horas en una congeladora (Haier ULT Frezzer DW-86W100J, China). El liofilizador es precalentado a -30°C , luego las muestras se introducen en el liofilizador a una presión de 0.1 mbar, una temperatura de plato de 25°C y una temperatura de condensador de -85°C por 24 horas. Por último, las muestras son retiradas para comparar la calidad con los demás secados.

La liofilización al remover la humedad de la muestra por sublimación en condiciones de vacío y temperatura ambiente permite minimizar la degradación de las cualidades organolépticas del alimento (Carrión, 2017).



Figura 13. Liofilizador Christ Alpha 2-4 LCSplus, Alemania.

- Determinación y análisis de las curvas de secado

Con el valor de la humedad inicial y la variación de la cantidad de agua en función del tiempo de proceso, se obtendrán las curvas de secado y de velocidad de secado para modelar la transferencia de materia entre el alimento y el sistema. Se empleará la Segunda Ley de Fick y el modelo difusión anómalo para modelar las curvas de secado, con el fin de evaluar cual modelo se ajusta mejor a los datos experimentales. Para analizar la influencia de las variables de proceso que no fueron constantes se utiliza MATLAB R2022A, con el fin de obtener el coeficiente de difusión efectiva y el parámetro α en el caso del modelo anómalo, usando como criterio de coeficiente de determinación (R^2).

- Determinación de actividad de agua y humedad

Para la actividad de agua (a_w) de las muestras se registró mediante el higrómetro (Aqualab Series 4TE, EE. UU.), el cual tiene una resolución de $a_w \pm 0.001$.

El contenido de humedad de una muestra se realiza según el método estipulado en Association of Official Analytical Chemists (AOAC) metodología 934.06. Para ello se introducen entre 5 a 10g de muestra en un desecador, en el cual se utiliza una bomba a vacío para alcanzar una presión de 0.3 bar.

Después, el desecador se introduce en una estufa (Mettler UFB-400, Alemania), a una temperatura de operación de 60°C, dejándolo dentro de la estufa por 3 o 4 días, o hasta que el peso de las muestras sea invariante.

Con la ecuación 7 se mide la humedad presente en las muestras:

$$H = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100 \quad (7)$$

Donde, H es la humedad de la muestra expresada en %, m_1 el peso de la muestra antes de ingresar a la estufa y m_2 es el peso seco de la muestra en g.

Para los resultados del cambio de humedad de las muestras en el tiempo se realizarán bajo la adimensionalización de la humedad según la ecuación 8.

$$M_{RT} = \frac{H_t - H_e}{H_0 - H_e} \quad (8)$$

Donde, M_{RT} es la humedad adimensionalizada, H_t es la humedad en el tiempo, H_0 la humedad inicial y H_e la humedad de las muestras en condición de equilibrio.



Figura 14. Higrómetro Aqualab Series 4TE, EE. UU.

- Extracción metanólica

Para cuantificar el contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante se debe hacer una extracción metanólica, la cual consiste en utilizar introducir 2 g de la muestra en 20 mL de metanol al 80% v/v. Cabe destacar que la solución siempre debe estar en oscuridad, por lo tanto, se debe envolver el recipiente con papel aluminio, luego se debe agitar para ser guardada por 1 hora en oscuridad para análisis posteriores.

- Determinación del contenido de polifenoles totales

La cuantificación del contenido de polifenoles totales se realiza mediante el método Folin-Ciocalteu y se expresa como mg de Ácido gálico equivalente por gramos de base seca. El método torna la solución de color azul, siendo proporcional la intensidad del color con el contenido de polifenoles en la muestra, donde la reacción que ocurre es del tipo Redox. (Galaz et al., 2017).

Antes de realizar la cuantificación se genera una curva de calibración con ácido gálico con concentraciones de 0 a 120 mg GAE/L. Para preparar las muestras de ácido gálico, se elabora una solución madre de 1 g/L usando como solvente metanol al 80% v/v. Después, se realizará otra dilución en matraces de 10 mL, donde se coloca 1 mL de la solución madre y se afora con metanol al 80% v/v. En el Anexo 3 se observa la curva de calibración.

Para realizar el análisis se necesitan 3 soluciones más a preparar, primero una solución de carbonato de sodio al 10% p/v, usando de solvente agua destilada. Otra solución es metanol al 80% v/v que se prepara con metanol 100% v/v diluido en agua destilada y finalmente, la solución de Folin-Ciocalteu al 50% v/v, la cual también se diluye con agua destilada.

Por último, para cada experimento en un tubo de ensayo cubierto con papel aluminio se le debe colocar 3.75 mL de agua destilada, 0.5 mL de la solución de carbonato de sodio, 0.5 mL de la solución de ácido gálico (curva de calibración) o los experimentos después de haber pasado por la extracción metanólica y 0.25 mL de solución Folin-Ciocalteu. Un tubo de ensayo no lleva ni ácido gálico, ni extracción metanólica, sino que metanol al 80% para hacer de blanco en el espectrofotómetro. Cada muestra se agita vigorosamente por 2 min, para luego ser guardado en la oscuridad por 1 hora. Por último, en celdas plásticas de 10 mL se vierte una pequeña cantidad de cada experimento y se mide su absorbancia en el espectrofotómetro (Spectronic Genesys 5, EE. UU.) a 765 nm (De la Vega et al., 2019).

Mediante la curva patrón obtenida se cuantifica el contenido de polifenoles totales, con la ecuación 9 mostrada a continuación:

$$PFT = C_M * \frac{V_{ext}}{M_M} * \left(\frac{1}{1 - X^W} \right) * F_D \quad (9)$$

Donde, PFT corresponde al contenido de polifenoles totales expresado en mg GAE/g BS, C_M es la concentración de la muestra medida a partir de la curva patrón de ácido gálico en unidades de mg GAE/L, V_{ext} el volumen usado de metanol al 80% en la extracción metanólica expresado en mL, M_M la masa de muestra usada en la extracción metanólica expresado en g, X^W la fracción de humedad de la muestra y F_D el factor de dilución.

● Determinación de la capacidad antioxidante

Para la cuantificación de la capacidad antioxidante se utiliza el método DPPH o radical libre, expresando el resultado en mg de Trolox por g de base seca (Galaz, et al., 2017).

Esta técnica esta basa en la medida de la absorbancia del radical DPPH, por lo que primero se prepara una solución de este reactivo, utilizando aproximadamente 7.88 mg del reactivo aforado con 200 mL de metanol al 100% v/v, donde para una longitud de onda de 517 nm en el espectrofotómetro la absorbancia debe estar entre 1.015 y 1.045. Igual que para el contenido de polifenoles totales, se prepara una curva patrón con Trolox (97% Thermo Scientific), desde 0 a 100 mg Trolox/L diluidos en metanol al 80% v/v. En el Anexo 4 se observa la curva de calibración.

Ahora, se añade 0.1 mL de la extracción metanólica y se afora con metanol al 80% v/v en matraces de 10 ml. Después, para cada experimento o para la curva patrón se le agregan 0.5 mL de solución del matraz y 2.5 mL de la solución de DPPH en un tubo de ensayo cubierto con papel metálico. Luego, se agita vigorosamente 2 min y se mantiene en la oscuridad durante 30 min. Finalmente, se midió la absorbancia es un espectrofotómetro (Spectronic Genesys 5, EE. UU.) a 517 nm.

Mediante una curva de calibración se calcula la concentración de DPPH en el medio de reacción, mediante la ecuación 10.

$$\text{Capacidad antioxidante} = C_M * \frac{V_{ext}}{M_M} * F_D \quad (10)$$

Donde, la capacidad antioxidante se expresa en mg Trolox/g BS, C_M es la concentración de la muestra medida a partir de la curva patrón de Trolox en unidades de mg Trolox/L, V_{ext} el volumen usado de metanol al 80% en la extracción metanólica expresado en L, M_M la masa de muestra usada en la extracción metanólica expresado en g, y F_D el factor de dilución.



Figura 15. Espectrofotómetro Spectronic Genesys 5, EE. UU.

- Determinación de sólidos solubles totales (SST)

Para cuantificar los sólidos solubles totales se introducen 2 g de muestra, fresca o seca en 25 mL de agua destilada en un vaso precipitado; se agita vigorosamente y se deja 30 min en reposo. Después, con un refractómetro (Hanna Instruments HI-96801, EE. UU.) de 0.1°Brix de resolución se miden los sólidos solubles colocando unas gotas en el equipo, el cual se calibra previamente con agua destilada, la cual tiene 0°Brix.

La ecuación 11 cuantifica los sólidos solubles totales presentes en la muestra.

$$X^{SS} = \frac{(MX_t^w + w)A}{M(100 - A)} \quad (11)$$

Donde X^{SS} es la fracción de sólidos solubles en la muestra en unidades g de SST por g de base seca, X_t^w es la fracción de agua o humedad de la muestra en el tiempo, M es el peso de

la muestra en g, w es la masa del agua destilada en g y A es la lectura del refractómetro de la muestra diluida expresada en °Brix.



Figura 16. Refractómetro Hanna Instruments HI-96801, EE. UU.

- **Determinación de color**

El color se midió utilizando un colorímetro (Konica Minolta modelo CR-410, Japón), el cual registra los parámetros de la escala de color de Hunter, mediante la metodología de espacio de color CIElab. Para esta escala “L*” denota la luminosidad, “a*” da la tonalidad rojo-verde y “b*” la tonalidad azul-amarillo de la muestra. Este espectro de colores se observa en la Figura 17.

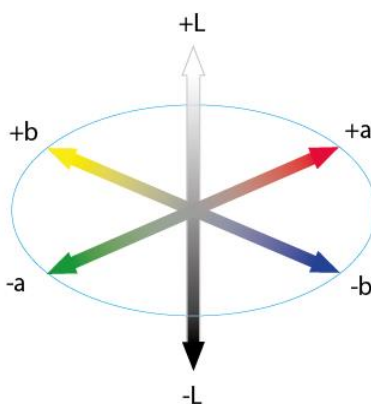


Figura 17. Espectro de colores de la escala Hunter.

Antes de las pruebas se debe realizar una calibración al equipo que consta de tomar una prueba a un objeto en blanco. Se utilizó un plato en donde deben resultar los siguientes parámetros: $Y = 93.63$, $x = 0.3135$, $y = 0.3196$.

Para cuantificar el cambio de color en las muestras en función de la distancia en el espacio

tridimensional de la escala de color Hunter se debe calcular el parámetro de la ecuación 12.

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_i^*)^2 + (a_0^* - a_i^*)^2 + (b_0^* - b_i^*)^2} \quad (12)$$

Se tiene que ΔE es la magnitud del cambio de color, donde los parámetros de la escala de Hunter de una muestra inicial son L_0^* , a_0^* , b_0^* son y los parámetros de la escala de Hunter para comparar una muestra deshidratada a la que se le quiere dimensionar el cambio en el color total de la muestra son L_i^* , a_i^* , b_i^* .

Según la norma ISO 12647-2 las diferencias significativas de color en las muestras se aprecian para valores del ΔE sobre las 5 unidades. Además, define los rangos de aceptabilidad para colores de impresión según la resolución del ojo humano a cambios en el color (Hernández, et al., 2017).



Figura 18. Colorímetro Konica Minolta modelo CR-410, Japón

- Medición de textura

Para la medición de textura en las muestras, se realizó un ensayo de compresión al 60% de deformación, con el objetivo de determinar la dureza de las muestras (Chen & Opara, 2013).

El ensayo se realizó usando un texturómetro (Brookfield engineering, modelo CT3-50K, UK), donde se usó una sonda con geometría cilíndrica alargada de 5 mm de diámetro con una velocidad de descenso de 1 mm/s y una carga de activación de 0.1 N para muestras

frescas de 3 ± 0.1 mm de espesor y muestras deshidratadas de 2 ± 0.2 mm de espesor. La dureza de la muestra es cuantificada como la máxima fuerza registrada por el texturómetro durante la compresión. Realizando 6 réplicas en las mediciones de textura para cada experimento. Los datos fueron procesados y entregados por el software TexturePro CT, que trabaja con el texturómetro.



Figura 19. Texturómetro Brookfield engineering, modelo CT3-50K, UK

- Eficiencia energética

Para cuantificar la eficiencia energética se calcula el consumo de energía en KWh con el medidor de potencia y energía (Power Meter, China) para el lote a secar. Luego, se calcula la energía consumida por gramo de materia prima. Cabe destacar que el objetivo del secado es buscar una actividad de agua menor o igual a 0.4, por lo que en ese punto termina la medición de energía.



Figura 20. Medidor de potencia y energía (Power Meter, China).

- Análisis estadístico

Los resultados se analizaron con una prueba de significancia con un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de rango múltiples de Duncan con un intervalo de confianza del 95% utilizando el software STATGRAPHIC Centurion XVI.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización de la materia prima

A la materia prima fresca se le determinaron parámetros de actividad de agua, humedad, color, sólidos solubles, capacidad antioxidante y contenido de polifenoles totales. La caracterización de la materia prima fresca se hizo posterior al pretratamiento, el cual corresponde un escaldado para inactivación enzimática.

Los resultados correspondientes a la caracterización de la materia prima fresca se observan en la Tabla 10.

Tabla 10. Propiedades de materia prima fresca

Propiedad	Valor	IC (95%)
Humedad (%)	92.09 ± 0.18	91.64 - 92.54
Actividad de agua	0.953 ± 0.005	0.942 - 0.964
Dureza (N)	138.24 ± 0.62	136.70 - 139.79
L	87.11 ± 0.23	86.53 - 87.69
Color	a	-0.92 ± 0.12 -1.23 - -0.61
	b	12.25 ± 0.48 11.06 - 13.45
	Espesor (mm)	3.00 ± 0.10 2.75 - 3.25
Dimensiones	Diámetro (mm)	30.00 ± 1.32 26.71 - 33.29
	Volumen (cm³)	2.12 ± 0.14 1.76 - 2.48
Sólidos solubles (g Xsst/g BS)	0.20 ± 0.01	0.17 - 0.24
Polifenoles (mg GAE/g BS)	9.19 ± 0.77	7.27 - 11.10
Capacidad antioxidante (mg Trolox/g BS)	5.74 ± 0.61	4.22 - 7.25

Para posterior evaluación del producto con los distintos métodos de secado y a las diferentes condiciones, las propiedades de la Tabla 10, correspondientes a la materia prima fresca son los parámetros de referencia. Comparar el producto final con la materia prima es crucial para evaluar el deterioro de las propiedades organolépticas, los polifenoles totales y el contenido de antioxidantes.

El contenido de polifenoles totales en hongos *Agaricus bisporus*, específicamente cepa blanca (champiñón) varía desde 8.0 a 9.4 (mg GAE/g BS) (Palma, et al., 2015) (Dubost, et al., 2007) según el método Folin-Ciocalteu. En la materia prima se obtuvo un contenido de

polifenoles totales de 9.19 ± 0.77 (mg GAE/g BS), valor que es comparable con la literatura. En cuanto a la capacidad antioxidante los hongos *Agaricus bisporus* cepa blanca según el método DPPH, el valor varía entre 3.36 a 6.72 (mg Trolox/g BS) (Yadav & Wilson, 2021). El valor obtenido es comparable con la literatura, ya que se obtuvo que la materia prima tiene 5.74 ± 0.61 (mg Trolox/g BS).

4.2 Determinación de tiempos de secado

Para establecer que el producto final deshidratado no se deteriore en un corto periodo de tiempo, debido a la presencia de microorganismos se utiliza como criterio una actividad de agua igual o menor a 0.4, debido a que con ese valor el agua disponible en la superficie del alimento no permite la proliferación de microorganismos que lo deterioren.

La actividad de agua tiene una relación inversamente proporcional con el tiempo, ya que disminuye con el avance de este último. El comportamiento de la actividad de agua en el tiempo para los experimentos a las dos temperaturas en ventana refractiva (VR) y para las dos temperaturas y tres potencias distintas en ventana refractiva acoplado a microondas (MW) se observa a continuación en las Figuras 21 y 22. También, en la Figura 23 se observa la evolución de la actividad de agua en el tiempo para el secado de pulpa, con el fin de contrastar con el secado de láminas.

Para un mayor control de la temperatura del agua, esta se satura con sal de mesa, por lo que en las Figuras 24 y 25 se observa el perfil de temperatura para las distintas condiciones de secado en MW. Y, por último, en las Figuras 26 y 27 se analiza el secado a las dos temperaturas y tres potencias distintas en MW, pero saturando el agua con sal de mesa.

Es preciso señalar que el tiempo considerado es solamente el de secado, es decir, cuando el agua alcanza la temperatura indicada para cada experimento. Debido a que en VR el tiempo de preparación del agua es considerablemente mayor al tiempo en MW.

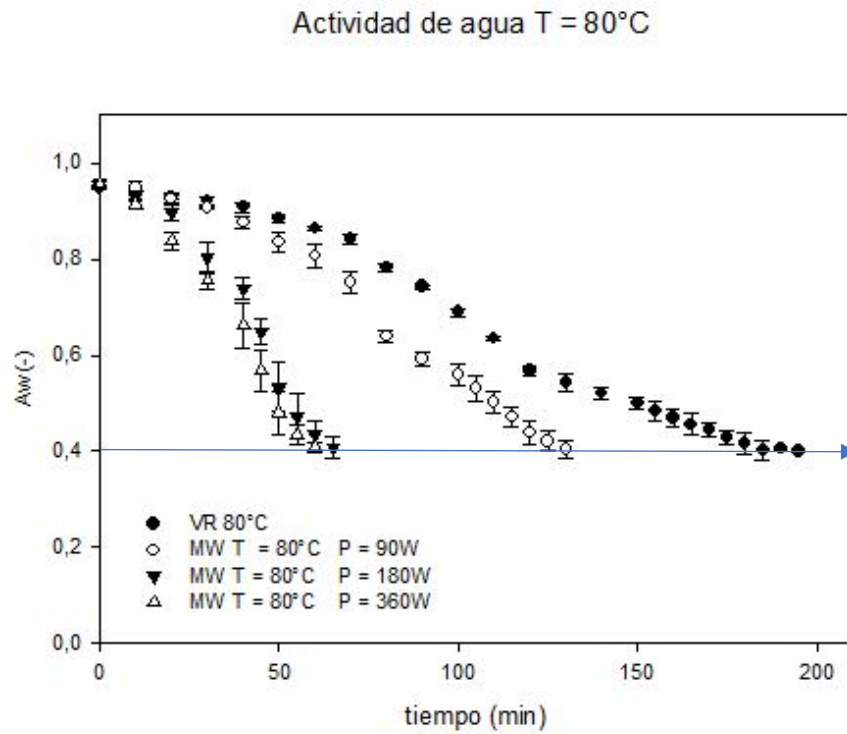


Figura 21. Actividad de agua medida durante secado con VR y VR+MW a 80°C

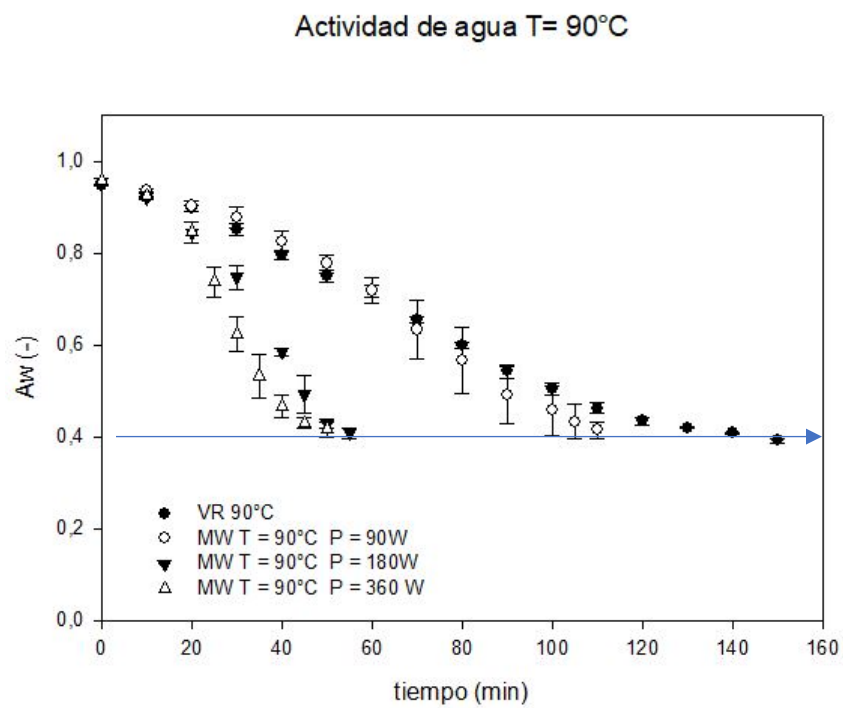


Figura 22. Actividad de agua medida durante secado con VR y VR+MW a 90°C

Actividad de agua en pulpa y láminas

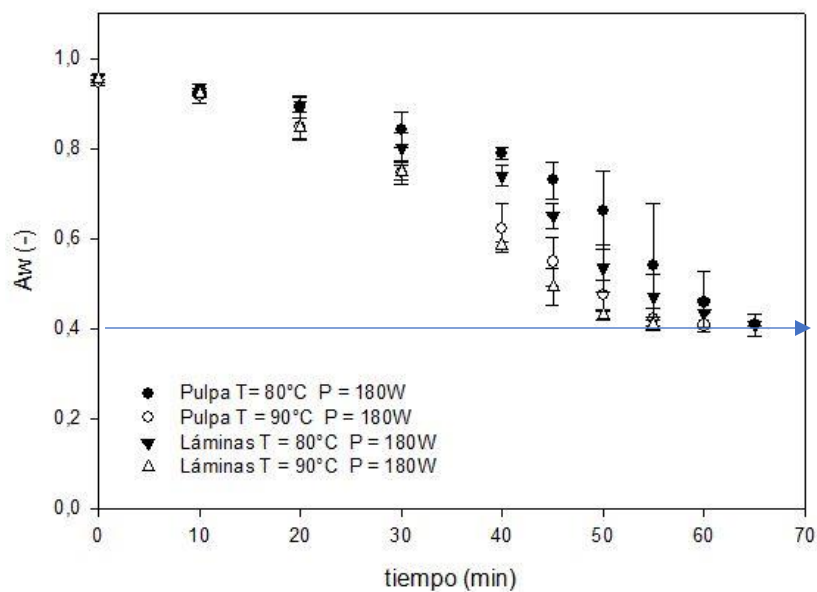


Figura 23. Actividad de agua pulpa y láminas durante el secado en VR+MW a 180W para 80 y 90°C

Perfil de temperatura MW 80°C

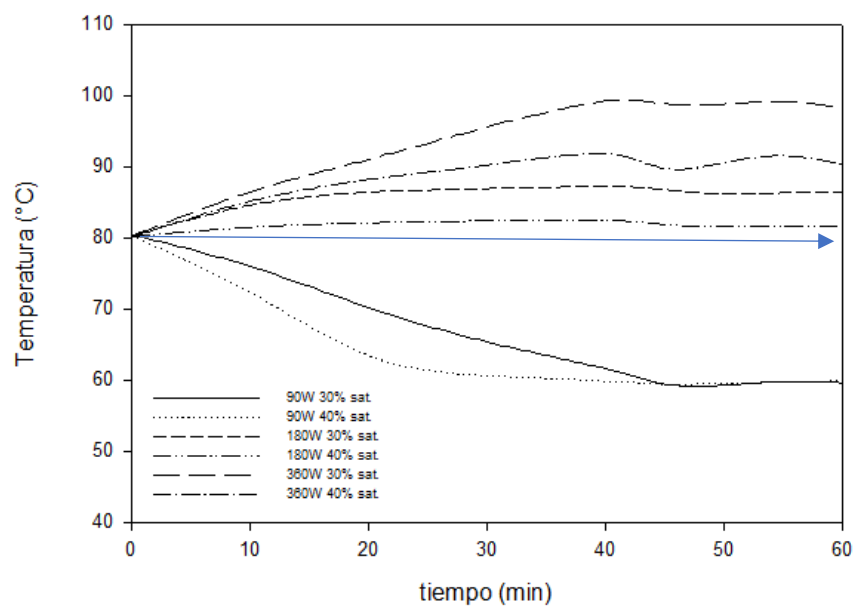


Figura 24. Perfil de temperatura MW 80°C

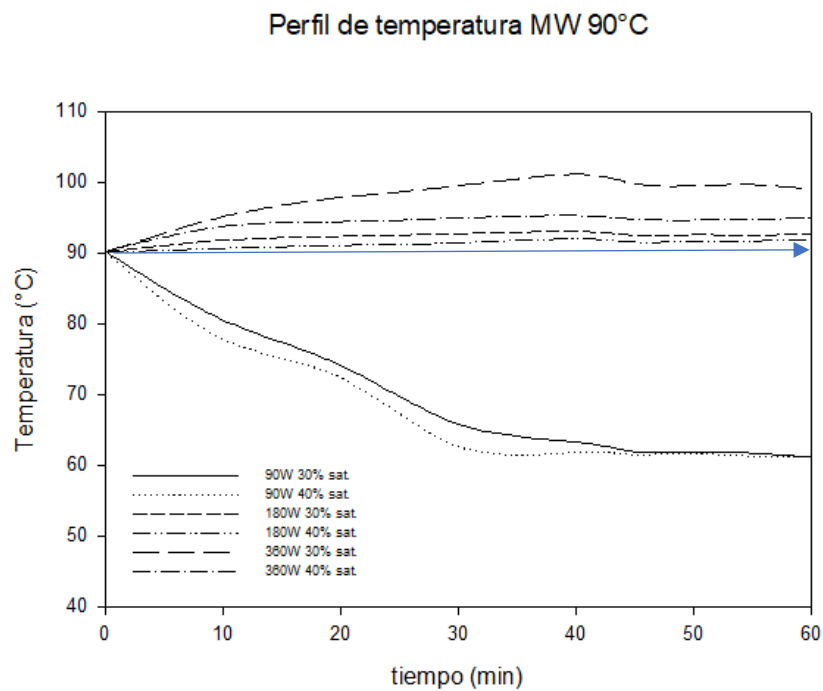


Figura 25. Perfil de temperatura MW 90°C

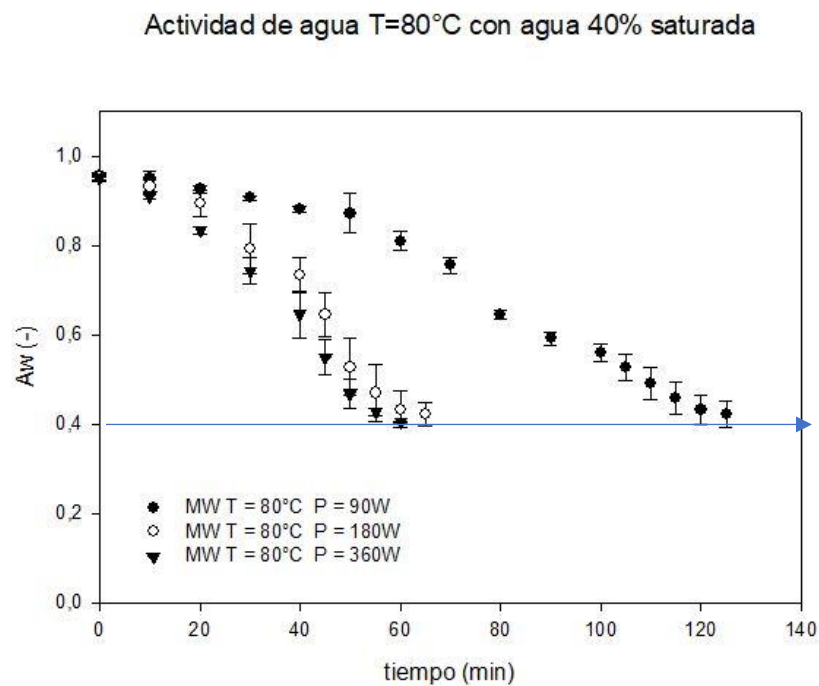


Figura 26. Actividad de agua medida durante secado en VR+MW a 80°C con agua 40% saturada

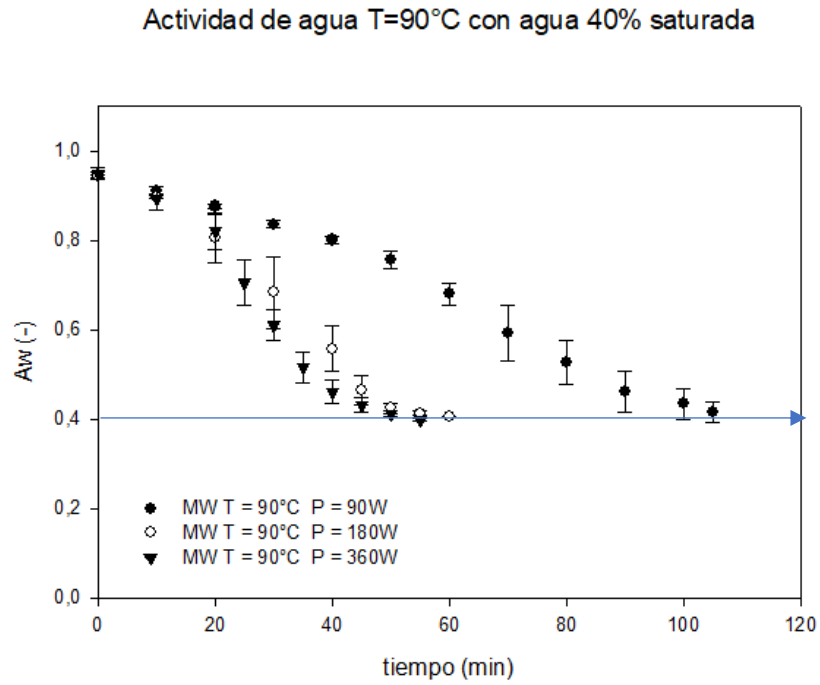


Figura 27. Actividad de agua medida durante secado en VR+MW a 90°C con agua 40% saturada

Para un mejor análisis, en la Figura 28 se observan los resultados de los tiempos de secado para los diferentes experimentos realizados.

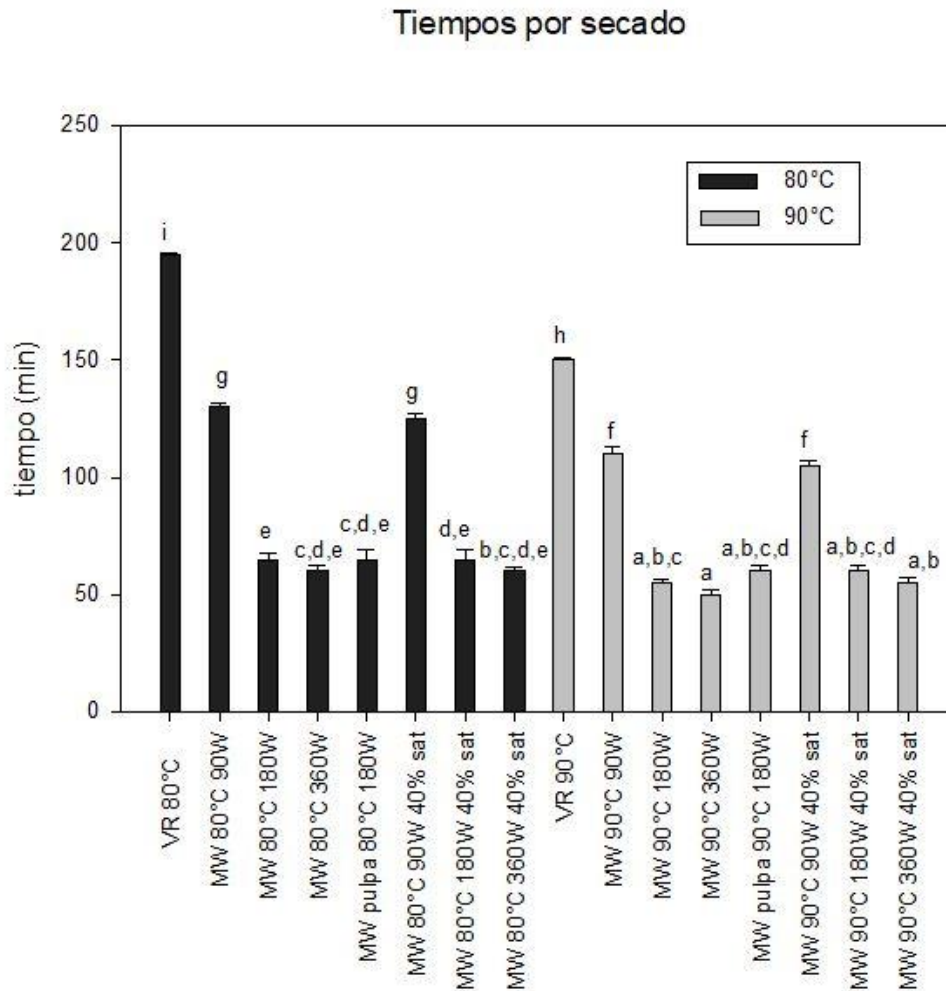


Figura 28. Tiempos de secado de todos los experimentos.

*Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Se observa que el tiempo de secado en VR es superior al tiempo de secado para todas potencias del microondas usadas. Además, hay una disminución en el tiempo de secado al aumentar la temperatura, ya que a 80°C el tiempo es de 195 min, mientras que a 90°C el tiempo de secado es de 150 min.

En el tiempo de secado para las distintas potencias del microondas se tiene que a medida que aumenta la potencia el tiempo de secado disminuye. De igual manera, con el aumento de la temperatura disminuye el tiempo de secado. En MW sin saturar el agua, para los 80°C los tiempos de secado van de 130 a 60 min y para los 90°C van de 110 a 50 min. De esta manera, el cambio en la potencia significa una reducción del tiempo de secado aproximadamente en un 54% y un 55% respectivamente.

Para el caso de la pulpa, se realizó solo a la potencia de 180W, ya que el tiempo de secado a 90W es considerablemente mayor que a 180W y a 360W la temperatura del agua alcanza los

99-100°C, lo que dificulta el secado por la formación de burbujas bajo el mylar. Resultando que a 80°C el tiempo de secado es prácticamente el mismo, 65 min; mientras que para los 90°C el secado en láminas demora 55 min y en pulpa demora 60 min. De esta manera, se descarta la opción del secado en pulpa, debido a que para las mismas condiciones el tiempo de secado es igual o mayor al secado en láminas.

Para tener un mejor control de la temperatura del agua dentro del microondas, esta se satura en un 40% con sal de mesa, con el fin de aumentar el punto de ebullición y evitar la formación de burbujas bajo el mylar que disminuyan la transferencia de calor; se opta por un saturado del 40% y no del 30%, porque al 40% se logra una temperatura más estable. Además, los tiempos de secado no se ven afectados, ya para 80°C van de 130 a 60 min y a la misma temperatura, pero saturando el agua los tiempos de secado van de 125 a 60 min; en el caso de los 90°C los tiempos de secado van de 110 a 50 min y al saturar el agua van de 105 a 55 min. Por lo tanto, se decide que las para obtener la cinética de secado se trabajara con el agua saturada, para tener mejor control de la temperatura del agua.

Por otro lado, para los 90W la disminución del tiempo en comparación a la VR es de aproximadamente 36% para los 80°C y 30% para los 90°C. Mientras que para los 180W la disminución de tiempo fue de 67 y 60% en comparación a la VR. Si bien la disminución de tiempo a los 360W es similar a los 180W, la primera potencia tiene problemas de formación de burbujas, aunque este saturada el agua, debido a que el agua llega cerca de los 95°C y es necesaria la intervención en el secado, lo que dificulta el proceso y lo hace menos eficiente.

En estudios anteriores de VR se ha evaluado que al disminuir el espesor el tiempo de secado decrece (Hernández, et al., 2017). Asimismo, en estudios relacionados a secado en microondas el tiempo de secado disminuye con el aumento de la potencia, pero se logra mejor calidad a menor potencia (Chandrasekaran, et al., 2013).

4.3 Determinación de cinética de secado

Para determinar la cinética de secado se generan curvas de humedad respecto al tiempo, donde este último es corresponde al tiempo obtenidos anteriormente para ventana refractiva y el sistema de ventana refractiva acoplada a microondas.

Se estudia la evolución de la humedad en el tiempo mediante una curva de la tasa de humedad (MR) en el tiempo en las Figuras 29 y 32, esto por medio de muestras de la masa del alimento, con el fin de ajustar las curvas mediante la Segunda Ley de Fick y el modelo anómalo, y con ello obtener los parámetros del modelo y el coeficiente de determinación (R^2) que indica la precisión del modelo en los cambios predictores se relacionan con los cambios en la variable de respuesta.

.

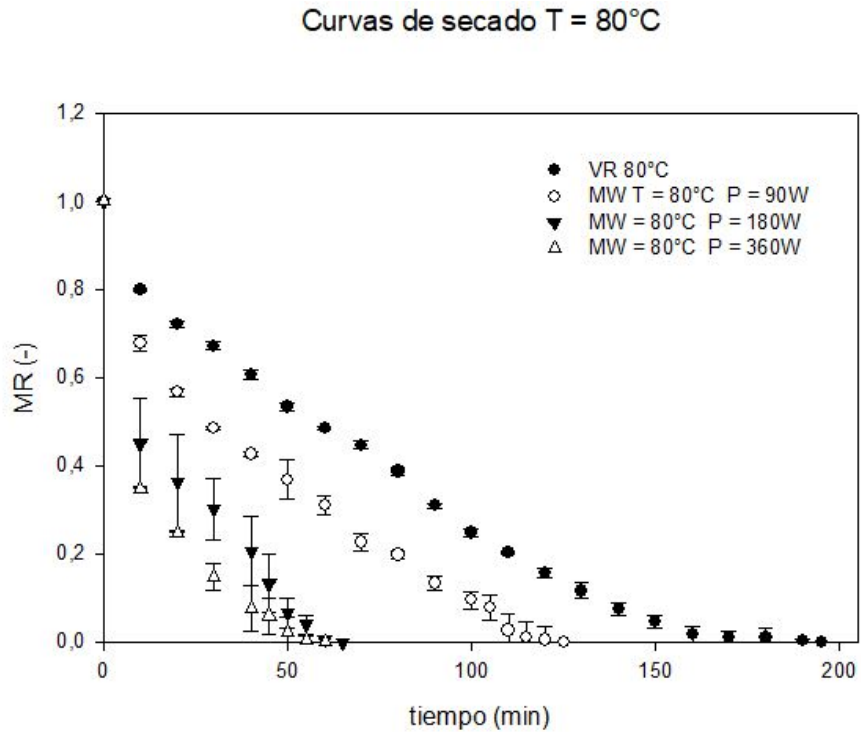


Figura 29. Curva de secado a 80°C

En las curvas de secado se observa que la velocidad de secado en ventana refractiva es menor que en microondas, y en este último la velocidad de secado aumenta a medida que aumenta la potencia del microondas. El comportamiento de la velocidad de secado a los 90W es similar a de la ventana refractiva, pero con distintos tiempos.

El comportamiento de la velocidad de secado a los 180W difiere un poco de las demás en la partida, ya que no disminuye de la misma forma, pero luego la curva adopta un comportamiento similar a las demás. Por otro lado, a los 360W la curva de humedad tiene una caída inicial es más abrupta en comparación con las demás, que tienen un comportamiento más constante.

El error en algunos puntos se debe que hay una variación que hay entre muestras, es decir, variación en las dimensiones o peso de la muestra.

En las Figuras 30 y 31 se observa las curvas experimentales con los ajustes mediante la Segunda Ley de Fick y el modelo anómalo.

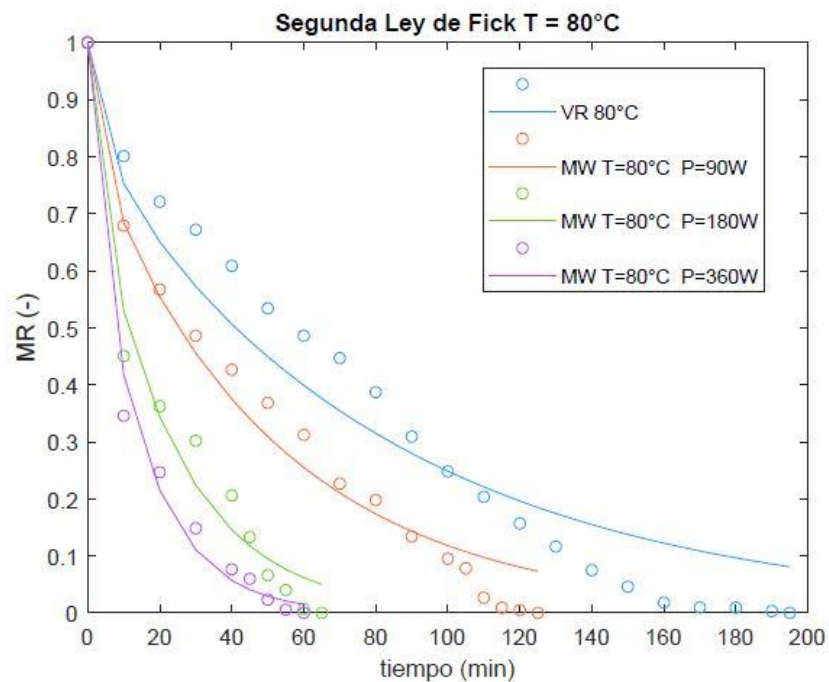


Figura 30. Ajuste de curva con Ley de Fick a 80°C

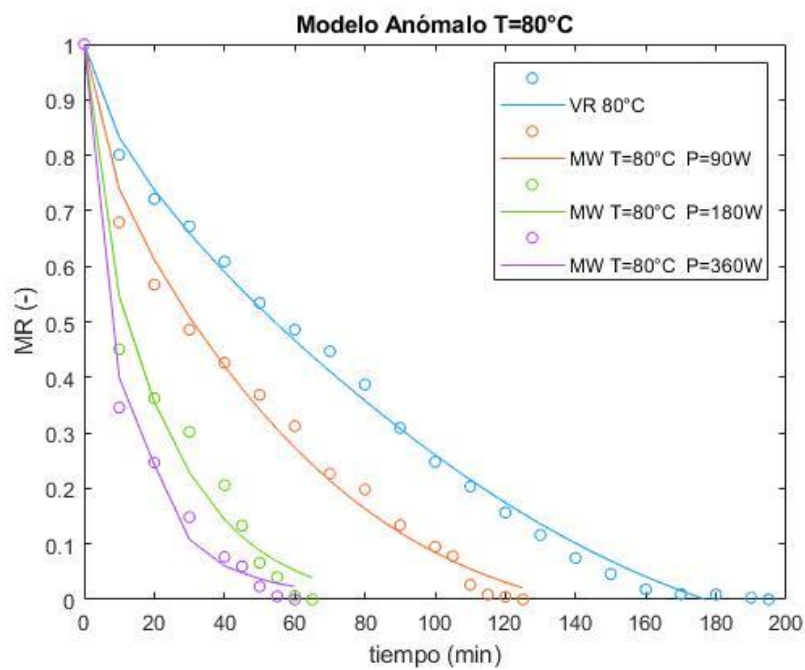


Figura 31. Ajuste de curva con modelo anómalo a 80°C

Se observa que la curva del modelo anómalo se ajusta mejor a los puntos experimentales que la Segunda Ley de Fick, ya que en esta última las curvas no recorren el mismo camino que los puntos experimentales, como lo hacen las curvas del modelo anómalo.

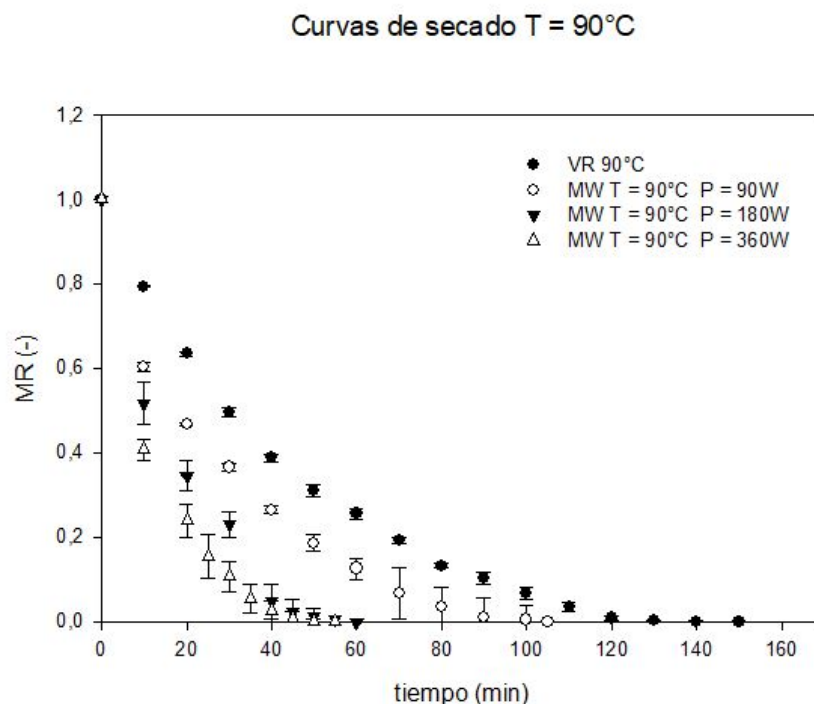


Figura 32. Curva de secado a 90°C

De igual forma que a los 80°C , aquí también se observa el comportamiento similar en la potencia del microondas, ya que la velocidad de secado es mayor a media que aumenta la potencia. Y al comparar las curvas de secado a las distintas temperaturas, a los 90°C la velocidad de secado es mayor que a los 80°C , debido a que en la primera hay un decaimiento más notorio en la tasa de humedad, ya que a mayor temperatura la masa del alimento disminuye con más facilidad al haber un más acelerado movimiento de las moléculas de agua desde la superficie del alimento al ambiente.

La curva de humedad a los 90W tiene un comportamiento similar a la ventana refractiva. Por otra parte, las curvas a 180W y 360W si bien llegan al punto final en puntos cercanos, a 360W la velocidad de secado es mayor, debido al decaimiento inicial en la tasa de humedad es más abrupto.

El error en algunos puntos igual que a los 80°C , se debe que hay una variación que hay entre muestras, es decir, variación en las dimensiones o peso de la muestra.

En las Figuras 33 y 34 se observa las curvas experimentales con los ajustes mediante la Segunda Ley de Fick y el modelo anómalo.

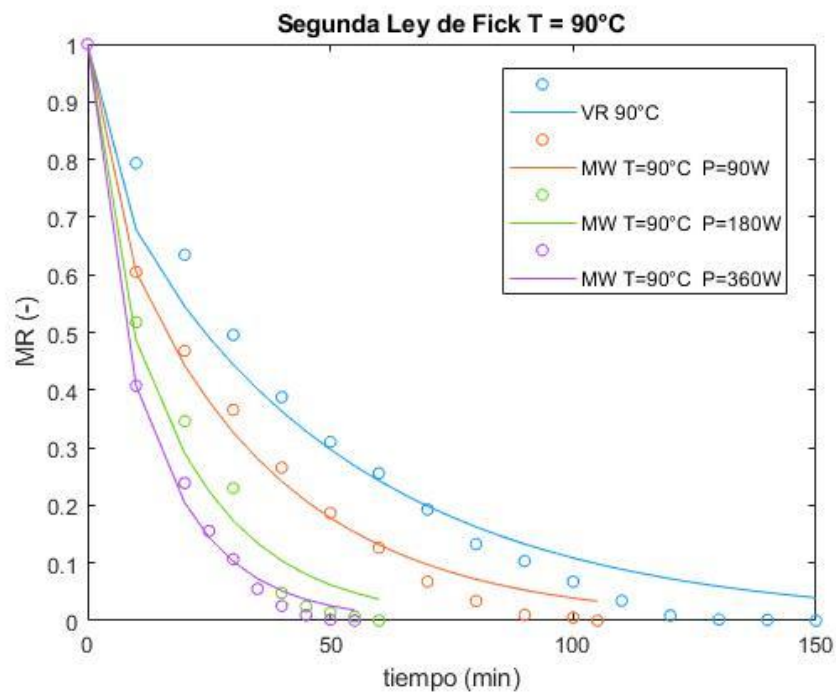


Figura 33. Ajuste de curva con Ley de Fick a 90°C

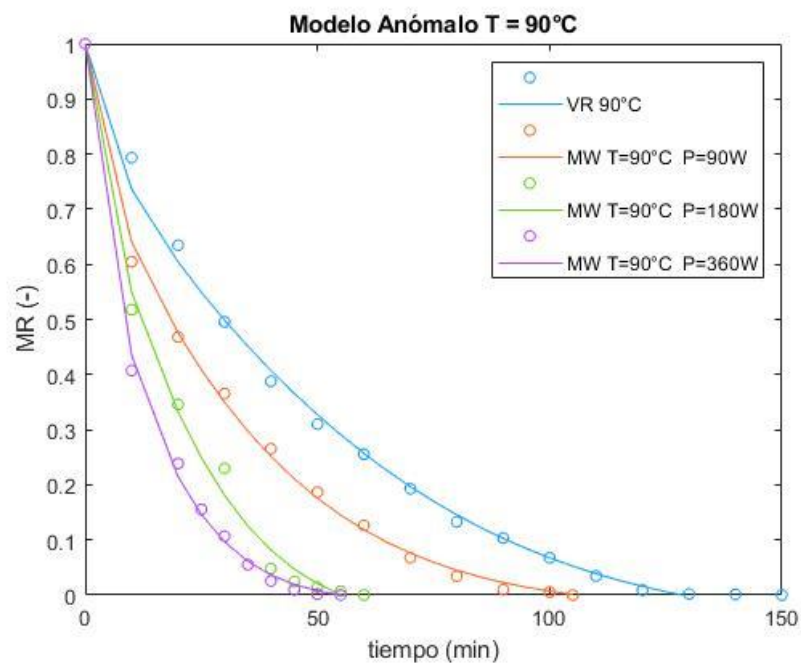


Figura 34. Ajuste de curva con modelo anómalo a 90°C

Al igual que a los 80°C, se observa que la curva del modelo anómalo se ajusta mejor a los puntos experimentales que la Segunda Ley de Fick. Esto se debe al parámetro α del modelo anómalo, denominado “orden fraccionario”, debido a que está relacionado con la microestructura del alimento, algo que no considera la Segunda Ley de Fick, ya que el alimento experimenta cambios estructurales al deshidratarse.

4.4 Determinación del coeficiente de difusión efectivo (D_{eff})

El coeficiente de difusión efectivo se determina con los datos experimentales mediante el ajuste realizado con la Segunda Ley de Fick y el modelo de difusión anómalo. En las Tablas 11 y 12 se observa el valor del coeficiente de difusión efectivo para experimento, además para el modelo de difusión anómalo se detalla el valor del parámetro α ; donde primero se detalla el valor de este último para cada experimento y luego se observa un valor característico para cada método de secado, es decir, hay un parámetro α para ventana refractiva y uno para ventana refractiva acoplada a microondas, ya que este parámetro solo depende el material alimenticio, mientras que el coeficiente de difusión efectivo tiene una dependencia con la temperatura. También se detalla el valor del coeficiente de determinación (R^2) ajustado y el error estándar de estimación (SEE).

Tabla 11. Coeficiente de difusión efectivo según la Segunda Ley de Fick a 80°C.

Método de secado	D_{eff} (m ² /s)	R^2 ajustado	SEE
VR 80°C	$4.31 \cdot 10^{-8} \pm 0.17^a$	0.9363	0.079
MW T=80°C P=90W	$7.03 \cdot 10^{-8} \pm 0.10^b$	0.9714	0.050
MW T=80°C P=180W	$1.57 \cdot 10^{-7} \pm 0.08^c$	0.9709	0.055
MW T=80°C P=360W	$2.42 \cdot 10^{-7} \pm 0.01^d$	0.9891	0.036

*Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Tabla 12. Coeficiente de difusión efectivo y parámetro α según modelo anómalo a 80°C

Método de Secado	D_{eff} (m ² /s ^a)	R ² ajustado	α	SEE	α promedio	D_{eff} (m ² /s ^a)	R ² ajustado
VR 80°C	$1.04 \cdot 10^{-8} \pm 0.01^a$	0.9949	1.2924	0.022	1.2304	$1.52 \cdot 10^{-8} \pm 0.15^a$	0.9726
MW T=80°C P=90W	$3.36 \cdot 10^{-8} \pm 0.06^a$	0.9885	1.1582	0.031	1.0761	$5.12 \cdot 10^{-8} \pm 0.52^a$	0.9772
MW T=80°C P=180W	$1.35 \cdot 10^{-7} \pm 0.23^b$	0.9680	1.0353	0.054	1.0761	$1.20 \cdot 10^{-7} \pm 0.22^b$	0.9689
MW T=80°C P=360W	$2.79 \cdot 10^{-7} \pm 0.16^c$	0.9913	0.9684	0.030	1.0761	$1.93 \cdot 10^{-7} \pm 0.35^c$	0.9850

*Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas (p≤0.05)

Tabla 13. Coeficiente de difusión efectivo según la Segunda Ley de Fick a 90°C

Método de Secado	D_{eff} (m ² /s)	R ² ajustado	SEE
VR 90°C	$7.33 \cdot 10^{-8} \pm 0.37^a$	0.9704	0.055
MW T=90°C P=90W	$1.11 \cdot 10^{-7} \pm 0.22^a$	0.9910	0.031
MW T=90°C P=180W	$1.87 \cdot 10^{-7} \pm 0.30^b$	0.9793	0.052
MW T=90°C P=360W	$2.51 \cdot 10^{-7} \pm 0.36^c$	0.9954	0.022

*Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas (p≤0.05)

Tabla 14. Coeficiente de difusión efectivo y parámetro α según el modelo anómalo a 90°C

Método de Secado	D_{eff} (m^2/s^{α})	R^2 ajustado	α	SEE	α promedio	D_{eff} (m^2/s^{α})	R^2 ajustado
VR 90°C	$3.38 \cdot 10^{-8} \pm 0.25^a$	0.9954	1.1684	0.021	1.2304	$2.87 \cdot 10^{-8} \pm 0.19^a$	0.9933
MW T=90°C P=90W	$7.48 \cdot 10^{-8} \pm 0.34^b$	0.9975	1.0899	0.015	1.0761	$8.32 \cdot 10^{-8} \pm 0.61^b$	0.9940
MW T=90°C P=180W	$1.04 \cdot 10^{-7} \pm 0.10^b$	0.9932	1.1464	0.028	1.0761	$1.45 \cdot 10^{-7} \pm 0.24^b$	0.9841
MW T=90°C P=360W	$1.98 \cdot 10^{-7} \pm 0.30^c$	0.9976	1.0585	0.015	1.0761	$1.98 \cdot 10^{-7} \pm 0.15^c$	0.9964

*Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Se observa en los resultados de los parámetros de los modelos que el modelo de difusión anómalo se ajusta mejor que la Segunda Ley de Fick a los puntos experimentales, como se había predicho anteriormente. Esta última no se ajustan eficientemente a los datos experimentales, lo que se refleja en el coeficiente de determinación (R^2), ya que los valores son más bajos en comparación con el modelo anómalo. Para el secado a 80°C la Segunda Ley de Fick entrega un R^2 que está contenido en el rango de 0.936 a 0.989, mientras que para el modelo anómalo el rango es de 0.968 a 0.995, valores que están más cercanos a 1. A los 90°C la Segunda de Fick se ajusta mejor a los datos experimentales en comparación a los 80°C, pero el modelo anómalo nuevamente se ajusta más eficientemente, ya que el primero tiene valores de R^2 en un rango de 0.970 a 99.5, mientras que en el modelo anómalo todos los valores están cercanos a 1, donde el menor valor es de 0.993. Además, los valores del error estándar de estimación (SEE) son mayor para la Segunda Ley de Fick en comparación con el modelo anómalo, lo que indica que este último tiene menor incertidumbre de variabilidad.

El modelo anómalo al tener valores de α cercanos a 1 se asemeja a la Segunda Ley de Fick, y por ello esta última en algunos experimentos se ajusta y modela la cinética de secado con una eficiencia cercana al modelo anómalo, ya que algunos experimentos logran un R^2 cercano a 1.

Según estudios anteriores los valores del coeficiente de difusión efectivo en los alimentos están en el rango de 10^{-8} y 10^{-11} (m^2/s) para temperaturas de secado entre 40 y 80°C mediante la técnica de secador solar (Mugi & Chandramohan, 2021). En otros estudios se menciona que el valor está en el rango de 10^{-6} a 10^{-12} (m^2/s), dependiendo de la temperatura y la técnica

de secado; y que alimentos de tejido blando, como los vegetales un valor común del coeficiente de difusión está en el orden de 10^{-10} (m^2/s), mientras que, para aquellos alimentos de una estructura dura y rígida, como nueces, cereales y especialmente arroz el valor está en el rango de 10^{-11} (m^2/s) (Doulia, et al., 2000).

En hongos alimenticios, especialmente el *Agaricus bisporus* cepa blanca (champiñón común) el valor del coeficiente de difusión efectivo varía en el rango de 10^{-9} y 10^{-10} (m^2/s) para temperaturas entre 40 y 70°C, mediante las técnicas de estufa con aire caliente convectivo, lecho fluidizado, secador de bandejas, y secador solar híbrido (Rhim & Lee, 2011) (Doymaz, 2014) (Arumuganathan, et al., 2009) (Mihalcea, et al., 2016) (Reyes, et al., 2013). Por otro lado, el valor del coeficiente de difusión efectivo en los experimentos realizados en ventana refractiva y ventana refractiva acoplada a microondas están en el rango de 10^{-7} y 10^{-8} (m^2/s); la diferencia con la literatura se debe a que este coeficiente tiene una fuerte dependencia con la temperatura según el modelo de Arrhenius (Hernández, et al., 2019), y en los experimentos las temperaturas usadas fueron más altas, se hicieron a 80 y 90°C logrando mayor velocidad en el secado. Además, la técnica de secado y las dimensiones del alimento son diferentes entre la literatura y los experimentos realizados, no obstante, los valores del coeficiente de difusión efectivo resultantes de las modelaciones realizadas a los datos experimentales están dentro del rango aceptado de la literatura.

De los valores del coeficiente de difusión efectivo, tanto como de la Segunda Ley de Fick, como del modelo anómalo se concluye que aumenta a medida que aumenta la potencia de las microondas, y la ventana refractiva tiene un coeficiente de difusión efectivo mejor a todas las combinaciones del sistema híbrido, ya que la velocidad de secado es más rápida al haber más de un mecanismo que entrega calor al alimento.

Para el parámetro α del modelo anómalo no hay referencias en la literatura acerca del secado de hongos alimenticios. Según estudios anteriores alimentos como salmón, carne de res y manzana el parámetro α tiene el valor de 0.85 ± 0.14 , 0.57 ± 0.09 y 1.23 ± 0.40 respectivamente en secado por ventana refractiva (Franco, et al., 2019). El ajuste con el modelo anómalo entrega un valor para α que oscila entre 1 y 1.3, lo que indica que el mecanismo es superdifusivo; solo existe un valor menor a 1 y se debe a que el secado a 360W genera burbujas bajo el mylar y disminuye la velocidad de secado.

El parámetro α como se dijo anteriormente, solo depende de la microestructura del alimento y no de la temperatura, por lo que se obtuvo un valor promedio para cada técnica de secado. Por lo que, con este valor promedio se recalculó el coeficiente de difusión efectivo, donde los valores no tienen diferencias significativas, ya que este parámetro solo depende de la temperatura. Además, se recalculó el coeficiente de determinación (R^2) y los valores son cercanos a 1 nuevamente, por lo que el modelo anómalo se ratifica con tener un mejor ajuste que la Segunda Ley de Fick.

4.5 Comparación de humedad y actividad de agua entre los hongos frescos y secados en VR, MW, túnel de secado y liofilizador.

En la Tabla 15 se observa la comparación de humedad y actividad de agua entre la materia prima, las condiciones de secado estudiadas en la cinética de secado y dos métodos de control, los cuales son túnel de secado y liofilizador.

Tabla 15. Comparación de humedad y actividad de agua entre hongo fresco y deshidratado.

Condición de secado	Humedad (%)	Aw (-)
Materia prima	92.09 ± 0.18 ^h	0.95 ± 0.01 ^f
VR 80°C	7.72 ± 0.08 ^c	0.41 ± 0.01 ^e
MW 80°C P=90W	9.30 ± 0.08 ^g	0.41 ± 0.01 ^{d,e}
MW 80°C P= 180W	8.74 ± 0.07 ^f	0.40 ± 0.01 ^{c,d}
MW 80°C P=360W	8.34 ± 0.07 ^e	0.39 ± 0.01 ^b
VR 90°C	8.36 ± 0.09 ^e	0.41 ± 0.01 ^{d,e}
MW 90°C P=90W	9.14 ± 0.06 ^g	0.41 ± 0.01 ^{d,e}
MW 90°C P=180W	8.64 ± 0.13 ^f	0.39 ± 0.01 ^{b,c}
MW 90°C P=360W	8.12 ± 0.17 ^d	0.39 ± 0.01 ^{b,c}
Túnel de secado	6.06 ± 0.09 ^b	0.40 ± 0.01 ^{c,d}
Liofilizador	5.05 ± 0.10 ^a	0.35 ± 0.01 ^a

*Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas (p≤0.05)

Los resultados para la humedad no eran un objetivo en este trabajo, es decir, no se buscaba un valor específico para este parámetro. Por el contrario, la actividad de agua es un parámetro determinante en la cinética y calidad del producto, ya que con ese valor se asegura cierta calidad y vida útil para el alimento deshidratado.

La materia prima tiene una actividad de agua de 0.95 ± 0.01 y el objetivo es llegar a un valor igual o menor que 0.4. Todas las condiciones de secado fueron realizadas con el objetivo de llegar al valor objetivo, donde el rango de 0.35 a 0.41 contiene todos los valores que se

obtuvieron en los distintos secados.

En cuanto a la humedad hubo una disminución importante en comparación con la materia prima, que tiene una humedad de 92.09 ± 0.18 %. Las distintas condiciones de secado en VR y MW llegan a valores de 7.5 a 9.5 %, mientras que el túnel de secado y liofilizador alcanzan humedades de 6 y 5% respectivamente. Además, se observa que a medida que aumenta la potencia del microondas la humedad del producto es menor, debido a que la energía que recibe el alimento es mayor y la velocidad de secado aumenta. De igual manera, se observa que en MW a los 90°C la humedad es menor que los 80°C, lo que se explica por la dependencia de la temperatura del coeficiente de difusión efectivo. Pese a esto, la humedad no final no presenta grandes diferencias entre las distintas condiciones de secado en MW.

El túnel de secado genera un ambiente con una humedad más baja en comparación a la VR o MW, por lo que se obtiene una humedad menor que en MW o VR. Por último, el liofilizador al sublimar las muestras estas llegan a humedad bajas no colapsando la estructura interna del alimento y manteniendo cualidades organolépticas.

Los errores se deben principalmente a variaciones entre muestras o una mala calibración de un equipo o instrumento.

4.6 Contenido de polifenoles totales

En la Figura 35 se presenta la comparación del contenido de polifenoles totales entre la materia prima y las distintas condiciones de secado. En el Anexo 2 se encuentran los valores específicos.

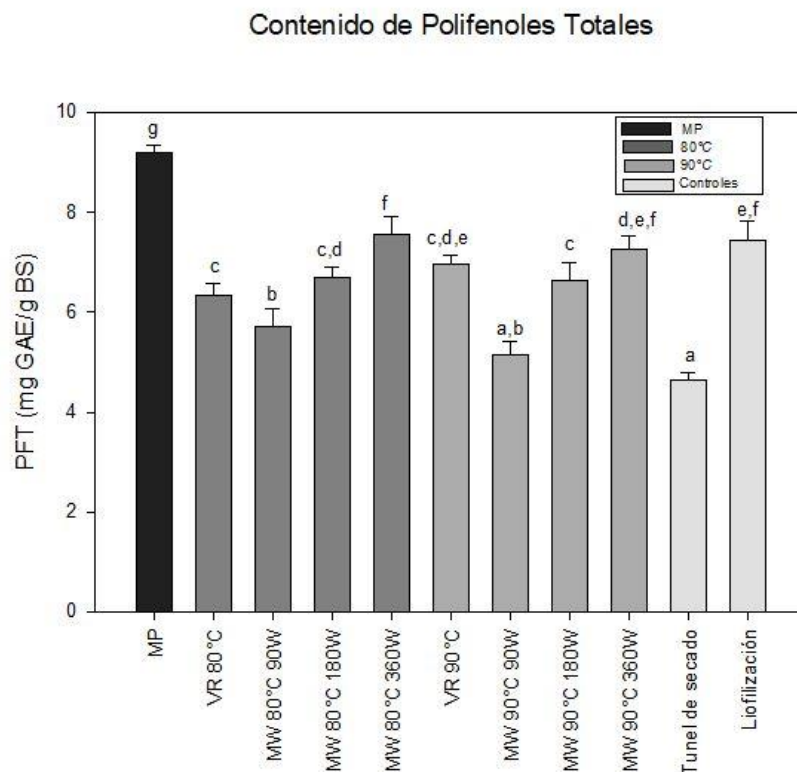


Figura 35. Contenido de polifenoles totales.

*Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

El contenido de polifenoles totales en distintos hongos comestibles varía entre 2 a 11 (mg GAE/g BS) y en hongos *Agaricus bisporus* cepa blanca el contenido de polifenoles totales están en el rango de 8 a 9.4 (mg GAE/g BS) (Palma, et al., 2015) (Dubost, et al., 2007); la materia prima empleada tiene un contenido de polifenoles totales de 9.19 ± 0.77 (mg GAE/g BS), lo que están dentro del rango hallado en literatura. Un estudio sobre extracto de hongos deshidratados menciona que el valor disminuye el contenido de polifenoles con el secado, estando en un rango de 0.02 a 4.5 (mg GAE/g BS) para diferentes tipos de hongos comestibles, y específicamente el *Agaricus bisporus* cepa blanca deshidratado presenta un contenido de polifenoles totales de 1 a 2.1 (mg GAE/g BS) (Robaszkiewicz, et al., 2010). En los experimentos realizados en VR y MW el valor de los polifenoles totales está en un rango de 5.16 a 7.26 (mg GAE/g BS), discrepando de estudios previos debido a que el proceso de secado es diferente y a la procedencia de la muestra.

En los experimentos realizados en VR se observa que con el aumento de la temperatura existe menos degradación de los polifenoles, debido a que el secado es más rápido y el alimento experimenta una alta temperatura por menos tiempo. En el secado en MW se aprecia que a medida que aumenta la potencia del microondas, disminuye la degradación de polifenoles. Cabe destacar que a los 180 y 360W no existe una diferencia significativa para las dos

temperaturas, donde a los 360W se obtiene un contenido de polifenoles totales más cercano a la materia prima en comparación con los demás secados; donde a los 80°C hay una disminución aproximadamente de 18% y a los 90°C fue del 21%. Además, se observa que en el secado en MW a 90°C y 90W se obtiene la mayor degradación de polifenoles totales en comparación con los experimentos realizados en MW, siendo aproximadamente del 44%.

El secado en MW a 180W presenta una degradación ligeramente superior a los 360W, siendo aproximadamente de 27% y 28% para los 80 y 90°C, respectivamente. Esto es de relevancia, ya que a los 180W la cinética de secado tiene los mejores resultados que a los 90 y 360W, debido a que a 360W el secado tiene dificultades con la generación de burbujas.

La ventana refractiva por su parte presenta una degradación de los polifenoles totales aproximadamente del 31 y 25% para los 80 y 90°C respectivamente. Teniendo una disminución similar a los 180W.

Por otro lado, el túnel de secado presenta una mayor degradación en comparación con todos los experimentos, debido al secado invasivo y con un ambiente de baja humedad, obteniendo una degradación de los polifenoles totales aproximadamente del 50%. En cambio, la liofilización logra una degradación similar a los 360W logrando una disminución del 19%, debido a que, a pesar de estar 24 horas en el equipo, este opera a temperatura ambiente provocando que los compuestos fenólicos no sean degradados con la misma rapidez que los otros métodos de secado.

Por último, si bien no hay datos en la literatura sobre el contenido de polifenoles en *Agaricus bisporus* secados en ventana refractiva o microondas acoplado a microondas, se concluye que la temperatura tiene gran relevancia en la degradación, pero la potencia del microondas regula la degradación de los polifenoles al disminuir el tiempo de exposición del alimento (Baibuch, et al., 2019).

4.7 Contenido de capacidad antioxidante

En la Figura 36 se presenta la comparación de la capacidad antioxidante entre la materia prima y las distintas condiciones de secado. En el Anexo 2 se encuentran los valores específicos.

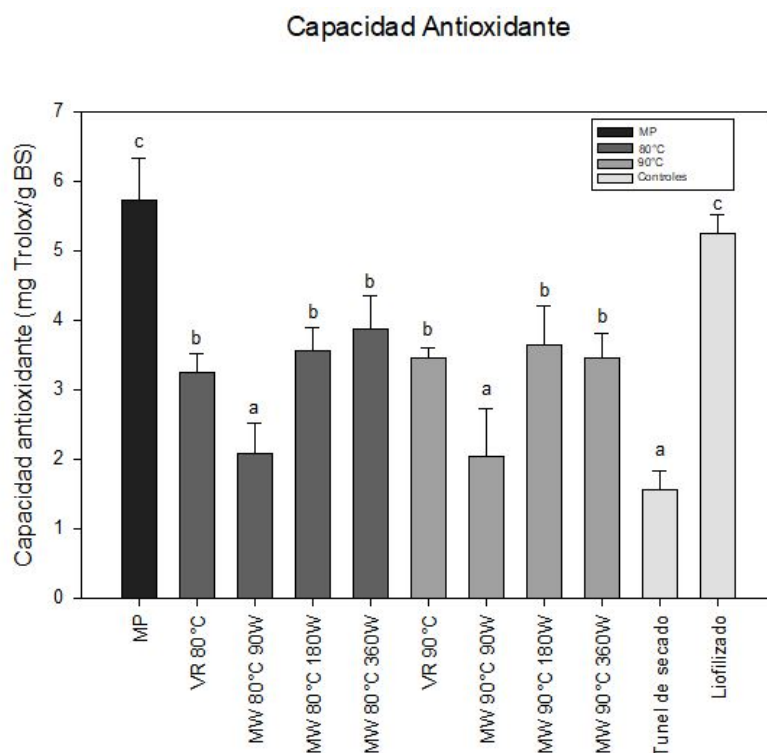


Figura 36. Contenido de capacidad antioxidante.

*Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

En estudios previos la capacidad antioxidante en hongos frescos *Agaricus bisporus* tiene valores en el rango de 3.4 a 6.8 (mg Trolox/g BS) (Yadav & Wilson, 2021); la materia prima tiene una capacidad antioxidante de 5.74 ± 0.61 (mg Trolox/g BS), lo que están dentro del rango de la literatura. Por otro lado, para diferentes hongos deshidratados la capacidad antioxidante va desde 0.1 a 5.2 (mg Trolox/g BS), y específicamente para *Agaricus bisporus* cepa blanca el valor está en el rango de 1.2 a 2.4 (mg Trolox/g BS) (Robaszkievicz, et al., 2010); en los diferentes secados en VR y MW la capacidad antioxidante está dentro del rango de 2.04 y 3.87 (mg Trolox/g BS), donde esta sobre el contenido hallado en estudios previos debido a que la técnica de secado es distinta y de la procedencia de la materia prima.

Se puede observar que los resultados son similares para ambas temperaturas, habiendo una ligera mayor capacidad antioxidante a los 80°C en algunos experimentos, ya que la temperatura es un parámetro que afecta la retención de la capacidad antioxidante. Por otro lado, para los secados en MW se aprecia que la degradación de la capacidad antioxidante disminuye con el aumento de la potencia del microondas, ya que aumenta la velocidad de secado y con eso la disminución del tiempo de exposición del alimento a altas temperaturas.

La degradación de la capacidad antioxidante a los 180W no tiene diferencias significativas con el secado a 360W, ya que la disminución es de aproximadamente 37% y 35%

respectivamente; mientras que para los 90W la disminución de la capacidad antioxidante es del 64% aproximadamente.

La ventana refractiva tiene una degradación de la capacidad antioxidante de aproximadamente el 40%, siendo ligeramente superior al secado en MW a 180W.

Por otro lado, si bien el secado en túnel de secado se realiza a una temperatura menor que en VR o MW, el método de secado es abrupto y tiene una importante degradación de la capacidad antioxidante, siendo del 73% aproximadamente. Por el contrario, El liofilizador al trabajar a temperatura ambiente no tiene una gran tasa de degradación, teniendo el mejor resultado en comparación con los demás experimentos realizados, ya que como se mencionó anteriormente la disminución de la capacidad antioxidante tiene fuerte dependencia de la temperatura, logrando una retención del 91% aproximadamente.

4.8 Sólidos solubles totales

En la Figura 37 se presenta la comparación de los sólidos solubles totales (SST) entre la materia prima y las distintas condiciones de secado. En el Anexo 1 se encuentran los valores específicos.

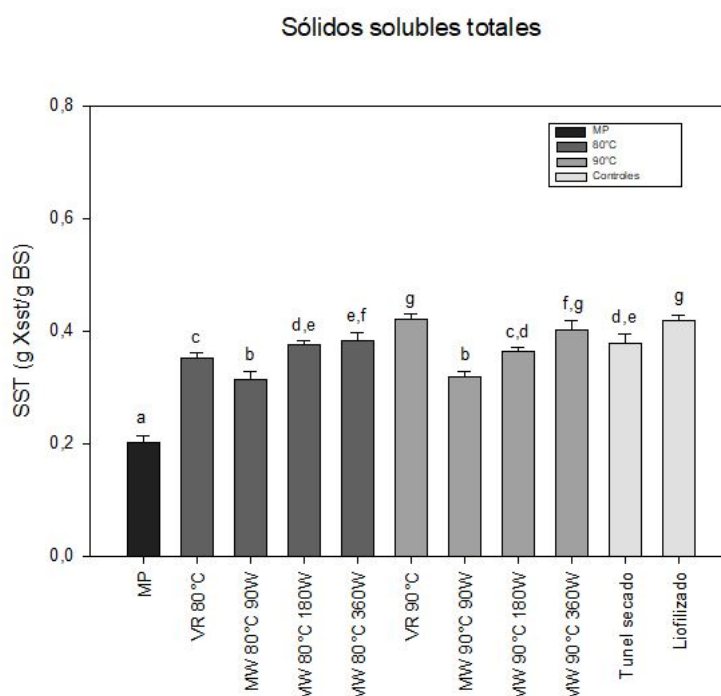


Figura 37. Sólidos solubles totales

*Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Estudios previos indican que el hongo *Agaricus bisporus* presenta una concentración de sólidos solubles totales en amplio rango de 0.1 a 0.85 (g Xsst/g BS) (Pardo, et al., 2004) (Liu, et al., 2010); la materia prima tiene una concentración de SST de 0.2 ± 0.01 (g Xsst/g BS), lo que está dentro del rango de la literatura.

En los experimentos realizados en VR y MW la concentración de SST está en el rango de 0.31 a 0.42 (g Xsst/g BS). Esta concentración aumenta a medida que aumenta la potencia del microondas, ya que está relacionado a la humedad final de la muestra. No hay grandes diferencias en la concentración de sólidos solubles totales, excepto el secado en MW a 90W que presenta un valor menor en comparación al resto de los experimentos. Por otra parte, la liofilización tiene resultados similares a la VR a 90°C y al MW a 360W

4.9 Propiedades organolépticas

4.9.1 Color

Las cuatro principales propiedades organolépticas en los alimentos son el sabor, aroma, color y textura; para el consumidor estos parámetros sin duda inciden en su elección, por lo que tener un secado que preserve en gran parte el color y la dureza de la materia prima es relevante para competir en el mercado.

En la Tabla 16 se observan los parámetros de color para la materia prima y cada condición de secado.

Tabla 16. Parámetros de color por condición de secado.

Condición de secado	L*	a*	b*
Materia prima	87.11 ± 0.23	-0.92 ± 0.12	12.25 ± 0.48
VR 80°C	60.25 ± 0.61	4.96 ± 0.09	21.55 ± 0.81
MW 80°C 90W	61.52 ± 1.15	4.04 ± 0.35	22.58 ± 0.75
MW 80°C 180W	58.21 ± 0.66	6.68 ± 0.05	29.06 ± 0.13
MW 80°C 360W	52.83 ± 0.91	6.47 ± 0.32	30.07 ± 0.83
VR 90°C	57.97 ± 0.79	6.22 ± 0.10	23.41 ± 0.47
MW 90°C 90W	60.87 ± 0.33	4.19 ± 0.15	22.98 ± 0.36
MW 90°C 180W	55.37 ± 1.22	6.95 ± 0.08	29.50 ± 1.09
MW 90°C 360W	51.97 ± 0.24	6.35 ± 0.08	26.95 ± 0.47
Túnel de secado	44.49 ± 0.66	7.02 ± 0.11	31.04 ± 0.32
Liofilizador	69.18 ± 0.39	1.70 ± 0.17	19.28 ± 0.85

En estudios previos se menciona que el *Agaricus bisporus* blanco fresco tiene un valor de L^* de 82 ± 2 , un valor de a^* es de 0 ± 1 , y un valor de b^* es de 12 ± 1 ; para la liofilización indica que L^* es de 71 ± 4 , a^* es 2.1 ± 0.5 y b^* es 17 ± 1 (Carrión, 2017). Por lo que, los resultados obtenidos son acorde a la literatura. Para VR y MW no se hallaron referencias de estudios previos.

Como se mencionó anteriormente, el parámetro L^* está relacionado a la luminosidad de la muestra, donde más cercano a 100 sea el valor de L^* más luminosidad hay en el producto. La materia prima tiene una luminosidad de 87.11 ± 0.23 y en los diferentes experimentos en VR y MW el valor de L^* están en el rango de 51 a 62, donde la mayor pérdida de luminosidad es a la potencia de 360W siendo de un 40% aproximadamente, ya que las muestras experimentan una gran transferencia de calor en comparación a los demás experimentos. El valor de L^* en VR y en MW a 90W es el más cercano al de la materia prima, disminuyendo en un 30% aproximadamente. Por último, en túnel de secado la disminución del parámetro es más significativa siendo del 50% aproximadamente; mientras que en el liofilizador se tiene la mejor retención de este parámetro disminuyendo solo un 20%, debido a que opera a temperatura ambiente y en condiciones de vacío, por lo que la alta temperatura no daña la superficie del alimento.

El parámetro a^* está relacionado a los colores rojo y verde, donde valores positivos indican presencia de color rojo y valores negativos la presencia del color verde. La materia prima presenta un valor de a^* de -0.92 ± 0.12 , lo que indica no tener una fuerte inclinación por un color, ya que el hongo *Agaricus bisporus* tiene un color similar al blanco. En los experimentos en VR y MW, secado en MW a 90W presenta una menor variación del parámetro a^* en comparación con los demás secados; mientras que el secado en MW a 180 y 360W presenta una mayor inclinación al color rojo. Por otra parte, el túnel de secado obtuvo resultados similares al MW a las mayores potencias; mientras que el liofilizador presenta la menor variación del parámetro a^* en comparación con todos los experimentos, siendo solo de un 15%.

El parámetro b^* se relaciona con los colores azul y amarillo, donde valores positivos indican presencia de color amarillo y valores negativos la presencia de color azul. El valor de b^* para la materia prima es de 12.25 ± 0.48 , lo que indica una inclinación al color amarillo. En los experimentos en VR y MW los valores están en el rango de 21 a 30, donde la mayor variación ocurre a mayor potencia. El túnel de secado presenta valores similares a las potencias altas, mientras que el liofilizador tiene la menor variación del parámetro b^* .

En la Figura 38 se muestran los cambios de color según el parámetro ΔE para la materia prima y cada condición de secado, donde los valores que sean mayores a 5 unidades llevan consigo una diferencia significativa.

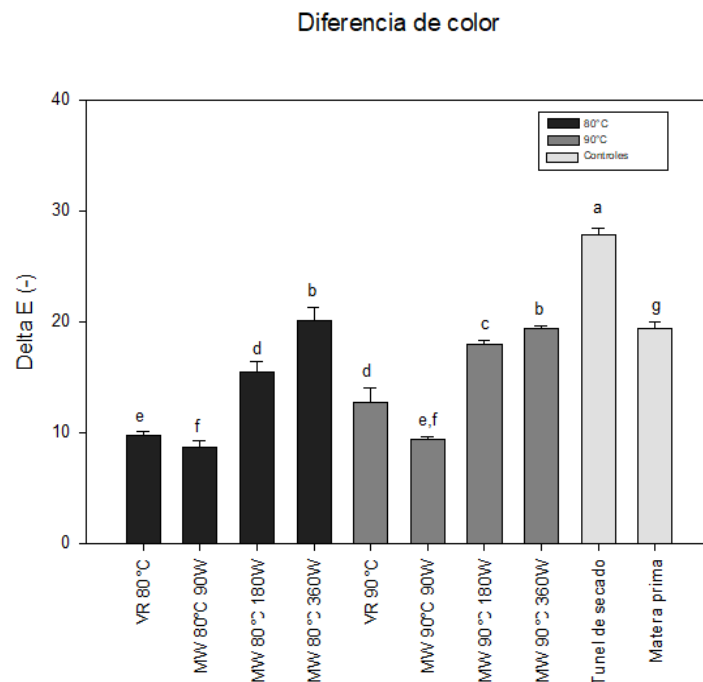


Figura 38. Diferencia de color por tipo de secado.

*Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Se observa que en todas las condiciones de secados la diferencia de color es mayor a 5 unidades en comparación con las muestras liofilizadas. La diferencia de color aumenta a medida que aumenta la potencia, siendo a 360W la mayor diferencia.

La diferencia de color se debe principalmente al parámetro L^* , ya que presenta las mayores diferencias, debido a que las muestras se oscurecen en comparación a la materia prima. El parámetro b^* presenta diferencias más significativas que a^* , ya que, si bien la atenuación del color rojo para los ojos humanos es notoria, la atenuación del color amarillo pese a no notarse tanto, esta variación es mayor.

En las figuras 39, 40 y 41 se observa la materia prima fresca y deshidratada



Figura 39. Color materia prima fresca



Figura 40. Color secado VR+MW



Figura 41. Color Liofilización

Para el consumidor es importante la apariencia del producto, por lo que la necesidad de que el hongo deshidratado se asemeje al aspecto de la materia prima es importante, por lo que el secado a 360W o mayores potencias queda descartado.

El microondas conlleva que los alimentos experimenten un cambio de color notorio, ya que en estricto rigor se quemada la superficie del alimento atenuando el color rojo y oscureciéndolo, lo que repercute en variaciones en el parámetro L* y a* (Chandrasekaran, et al., 2013).

Por último, los errores en la medición de cada parámetro para cada condición de secado están relacionados con la variación entre muestras, ya que para un mismo proceso de secado existen variaciones entre estas.

4.9.2 Textura

En la Figura 42 se presenta la comparación de textura entre la materia prima y las distintas condiciones de secado. En el Anexo 1 se encuentran los valores específicos.

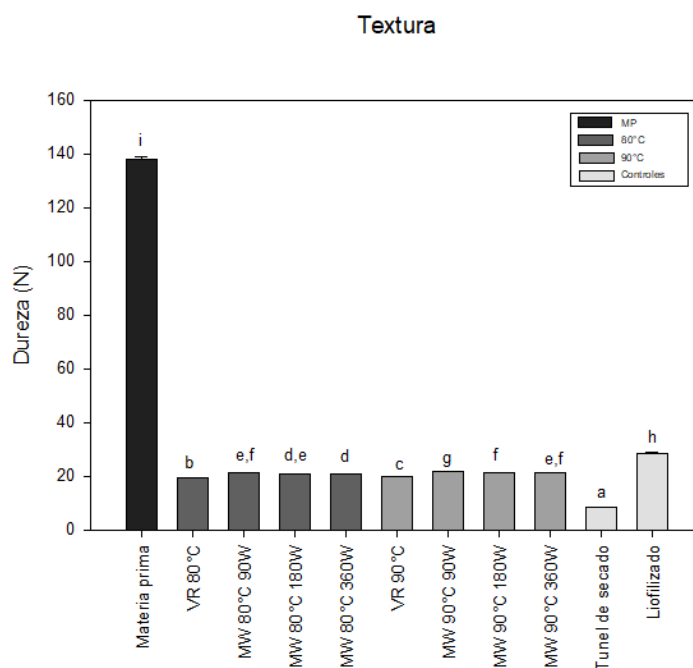


Figura 42. Textura por tipo de secado.

*Letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Estudios previos indican que para un ensayo de doble compresión al 50% de deformación, obteniendo una dureza de 242 ± 27 N para la materia prima fresca, mientras que para las muestras liofilizadas se menciona que la dureza es de 25 ± 8 N (Carrión, 2017). Si bien existe diferencias en la materia prima, esto se debe a que la prueba de compresión es distinta, pero

queda claro que el champiñón fresco tiene una gran dureza.

Se observa que la materia prima presenta una mayor dureza que las muestras deshidratadas, las cuales no presentan diferencias significativas para las distintas condiciones de secado. Se aprecia un ligero aumento de la dureza a medida que disminuye la potencia, debido a que potencias altas la humedad es menor y la resistencia de las muestras disminuye.

La materia prima soporta una fuerza de 138.24 ± 0.62 N, mientras que las muestras de los distintos secados en VR y MW soportan aproximadamente 21 N, lo que corresponde al 15% de la dureza del hongo fresco.

Por otra parte, el túnel de secado tiene la menor resistencia, siendo de aproximadamente un 6% de la resistencia de la materia prima. Mientras que las muestras liofilizadas presentan mayor dureza que todos los demás experimentos, ya que la estructura interna del alimento no fue tan deteriorada al operar en vacío y temperatura ambiente, como ocurrió en los demás secados. La liofilización permite conservar aproximadamente el 21% de la dureza que tiene la materia prima.

4.10 Eficiencia energética

Para la eficiencia energética se consideró el consumo energético en deshidratar un lote de la materia prima hasta una actividad de agua de 0.4. Luego, se calcula la eficiencia energética con la energía necesaria y consumida. Cabe destacar que la energía calculada comienza desde que el agua está a la temperatura necesaria para el proceso de secado. En la Tabla 17 se observa la eficiencia energética que tuvo cada condición de secado.

Tabla 17. Eficiencia energética para los distintos secados en VR y MW.

Condición de secado	Energía necesaria (kWh/kg)	Energía consumida (kWh/kg)	Eficiencia energética (%)
VR 80°C	1.09	5.08	21.48
MW 80°C P=90W	1.09	3.25	33.54
MW 80°C P=180W	1.09	5.52	19.75
MW 80°C P=360	1.09	9.67	11.27
VR 95°C	1.27	4.41	28.80
MW 95°C P=90W	1.27	2.63	48.29
MW 95°C P=180W	1.27	3.52	36.08
MW 95°C P=360W	1.27	5.39	23.56
Túnel de secado a 70°C	1.03	5.84	17.64

Además, sí se observa un aumento en la eficiencia al comparar el microondas con la ventana refractiva para potencias de 90 y 180W, el valor de la ventana refractiva se asemeja más al del microondas a potencia de 180W. En el caso de la potencia de 360W la eficiencia es menor debido al consumo de energía. También se comprueba que para mayor temperatura se tiene más eficiencia ya que el proceso ocurre en menor tiempo. Comparando con túnel de secado, el método comúnmente usado en la industria se obtiene que este presenta una eficiencia baja comparada con el secado en VR más MW.

Se observa que, en el caso del microondas, a mayor temperatura se tiene más eficiencia energética debido a que el tiempo es más corto y a mayor potencia la eficiencia disminuye debido a que se consume mayor cantidad de energía en referencia a la que se necesita realmente.

En estudios previos las tecnologías híbridas presentan eficiencias energéticas muy bajas, como aire caliente más secador rotatorio, con una eficiencia del 40%; el gas más energía solar que presenta un 42.79% (Menon, et al., 2020).

Secados de alimentos con microondas presentan eficiencias entre un 10% y un 20% aproximadamente (Chandrasekaran, et al., 2013). Tecnologías híbridas que usan microonda y secado a vacío tiene eficiencias entre 20-30% (Menon et al, 2020). Por lo tanto, este estudio logra mejores eficiencias, con valores entre el 20% y 50%.

Una investigación previa demostró que la ventana refractiva presenta una eficiencia aproximadamente del 30% (Baeghbali & Niakosauri, 2018). Los resultados de esta investigación presentan eficiencias entre el 20% y 30%, por lo que, es comparable con la literatura.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5. Conclusiones

La deshidratación en el sistema híbrido ventana refractiva acoplada a microondas disminuye los tiempos de procesamiento y aumenta la eficiencia energética, generando un producto final con una calidad similar a la liofilización.

En la modelación de las curvas de humedad mediante la Segunda Ley de Fick y el modelo de difusión anómalo se obtuvo que este último modelo representa el fenómeno de deshidratación con mayor precisión y exactitud. El modelo indica un comportamiento superdifusivo, ajustándose mejor a los puntos experimentales de humedad en el tiempo. El resultado fue similar en todas las combinaciones de temperatura y potencia, así como también para el secado en ventana refractiva por sí sola.

Se obtiene una reducción del tiempo de secado aproximadamente en un 65% para los 360W, en un 62% para los 180W y 33% para los 90W.

En cuanto a la eficiencia energética los mejores resultados se obtuvieron a las menores potencias del microondas. La eficiencia energética en el sistema híbrido es mayor a los 90 y 180W comparado con la ventana refractiva, aumentando aproximadamente en un 60 y 20 % respectivamente.

Para los parámetros de calidad nutricional, antioxidantes y polifenoles, se obtuvo que la temperatura afecta en gran medida a su degradación. Aunque, la potencia del microondas y el tiempo de secado también inciden en la disminución de los compuestos de interés. Por otro lado, en las propiedades organolépticas las potencias más altas afectan en mayor medida al color, específicamente a la pérdida de luminosidad e intensificación del color rojo.

Las condiciones que permiten obtener un producto con una calidad similar a la liofilización, disminuyendo el tiempo de secado comparado con la ventana refractiva es una temperatura de 90°C, con potencia de 180W y el agua saturada en un 40% con sal de mesa.

Finalmente, se concluye que la ventana refractiva acoplada a microondas es una tecnología innovadora que entrega un producto de calidad en poco tiempo y con alta eficiencia energética

6. Recomendaciones

Para el secado en microondas se recomienda realizar un arreglo que permita procesar mayor masa de materia prima fresca, por lo que un microondas con mayor capacidad o con un mayor número de pisos es una opción viable.

Otra recomendación para mejorar el secado a altas potencias es implementar una vía de evacuación para el vapor generado por el agua de la ventana refractiva adaptada, ya que el vapor dificulta el secado al interactuar con las láminas del alimento.

Evaluar la calidad sensorial del producto final de las muestras obtenidas es algo a considerar en futuras investigaciones para evaluar la aceptabilidad del consumidor.

CAPÍTULO VI

REFERENCIAS

7. Referencias

Abonyi, B. y otros, 2002. *Quality retention in strawberry and carrot purees dried with refractance window TM system*.

Arumuganathan, T., Manikantan, M. R., Rai, R. D., Anandakumar, S., & Khare, V. (2009). Mathematical modelling of drying kinetics of milky mushroom in a bed dryer. *International agrophysics*, 23(1), 1-7.

Baeghbali, V. & Niakosauri, M., 2018. *A review on mechanism, quality preservation and energy effiience in Refractance Window drying: a conductive hydri.drying technique*.

Baibuch, S., Julieta, G., Carmen, C. & Laura, M., 2019. *Efecto de las condiciones de deshidratación sobre el contenido de polifenoles y la actividad antioxidante de pétalos de rosas*.

Barros, L., Cruz, T., Baptista, P., Estevinho, L. M., & Ferreira, I. C. (2008). Wild and commercial mushrooms as source of nutrients and nutraceuticals. *Food and Chemical Toxicology*, 46(8), 2742-2747.

Barros, L., Ferreira, M. J., Queiros, B., Ferreira, I. C., & Baptista, P. (2007). Total phenols, ascorbic acid, β -carotene and lycopene in Portuguese wild edible mushrooms and their antioxidant activities. *Food chemistry*, 103(2), 413-419.

Bernaert, N., Van Droogenbroeck, B., Van Pamel, E. & De Ruyck, H., 2019. *Innovative refractance window drying technology to keep nutrient value during processing*.

Caparino, O. y otros, 2013. *Water sorption, glass transition and microstructures of refractance window and freeze dried mango*.

Carrión Balufo, C. (2017). *Influencia de la aplicación de ultrasonidos en la cinética de liofilización a presión atmosférica y en la calidad final de champiñón* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).

Chandrasekaran, S., Ramanathan, S. & Basak, T., 2013. *Microwave food processing- A review* , India.

Chen, L. & Opara, U., 2013. *Texture measurement approaches in fresh and processed foods. A review*. *Food Research International*.

Cismaru, A. & R.Marcelli, 2006. *CPW magnetostatic wave band stop resonators*. Roma.

Clarke, P., 2004. *Refractance window TM "Down under"* , Sao Paulo, Brazil.

Corzo, O. y otros, 2011. *Determinación experimental del coeficiente de difusión del agua durante el secado de láminas de coroba*.

Das, I., & Arora, A. (2018). Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying. *Journal of Food Engineering*, 223, 208-219.

Datta, A. & Anantheswaran, R., 2000. *Handbook of microwave technology for food applications*, New York.

De la Vega, J., Cañarejo, M., Cabascango, O. & Lara, M., 2019. *Deshidratado de Physalis peruviana L. en dos Estados de madurez y su efecto sobre el contenido de polifenoles totales*,

capacidad antioxidante, carotenos, color y ácido ascórbico. , Ecuador.

Dehkordi, B. M. (2010). Optimization of the Process of Osmo–Convective Drying of Edible Button Mushrooms using Response Surface Methodology (RSM). *International Journal of Chemical and Molecular Engineering*, 4(1), 106-110.

Douliá, D., Tzia, K., & Gekas, V. (2000). A knowledge base for the apparent mass diffusion coefficient (DEFF) of foods. *International Journal of Food Properties*, 3(1), 1-14.

Doymaz, I. (2014). Drying kinetics and rehydration characteristics of convective hot-air dried white button mushroom slices. *Journal of Chemistry*, 2014.

Dubost, N. J., Ou, B., & Beelman, R. B. (2007). Quantification of polyphenols and ergothioneine in cultivated mushrooms and correlation to total antioxidant capacity. *Food chemistry*, 105(2), 727-735.

FAOSTAT, 2021. FAOSTAT.

Franco, S. y otros, 2019. *Dehydration of salmon (Atlantic salmon), beef and apple (Granny Smith) using Refractance window: Effect on diffusion behavior, texture, and color changes*, Valparaíso.

Gaitán-Hernández, R., Quintero-Cabello, K. P., González-Aguilar, G. A., & Ayala-Zavala, J. F. Hongos comestibles, fuente natural de vitamina E. In *Pie* (Vol. 3, No. 30.95, pp. 18-49).

Galaz, P., Valdenegro, M., Ramírez, C., Nuñez, H., Almonacid, S., & Simpson, R. (2017). Effect of drum drying temperature on drying kinetic and polyphenol contents in pomegranate peel. *Journal of Food Engineering*, 208, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.002>

Guija, E., Inocente, M., Ponce, J. & Zarzoza, E., 2015. *Evaluación de la técnica DPPH para determinar capacidad antioxidante*.

Henríquez, C. y otros, 2010. *Determination of antioxidant capacity, total phenolic content and mineral composition of different fruit tissue of five apple cultivars grown in Chile..* Valparaíso.

Hernández, Y., Simpson, R., Ramírez, C. & Núñez, H., 2017. *Deshidratación de manzanas tipo Granny Smith en ventana refractiva con pretratamiento de deshidratación osmótica y campo eléctrico moderado.* , Valparaíso.

Hernández, Y., Ramírez, C., Moreno, J., Núñez, H., Vega, O., Almonacid, S., ... & Simpson, R. (2020). Effect of Refractance Window on dehydration of osmotically pretreated apple slices: Color and texture evaluation. *Journal of Food Process Engineering*, 43(2), e13304.

Indiarto, R., Asyifaa, A. H., Adiningsih, F. C. A., Aulia, G. A., & Achmad, S. R. (2021). Conventional and advanced food-drying technology: A current review. *Int. J. Sci. Technol. Res*, 10(1), 99-107.

Kumla, J., Suwannarach, N., Sujarit, K., Penkhruue, W., Kakumyan, P., Jatuwong, K., ... & Lumyong, S. (2020). Cultivation of mushrooms and their lignocellulolytic enzyme production through the utilization of agro-industrial waste. *Molecules*, 25(12), 2811.

Lacueva, A. y otros, 2010. *Phenolic compounds: Chemistry and occurrence in fruit and*

vegetables.

Lawless, H. & Heymann, H., 2010. *Sensory evaluation of Food. In Springer (Seond).*

Li, C., & Xu, S. (2022). Edible mushroom industry in China: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 106(11), 3949-3955.

Liu, Z., Wang, X., Zhu, J., & Wang, J. (2010). Effect of high oxygen modified atmosphere on post-harvest physiology and sensorial qualities of mushroom. *International journal of food science & technology*, 45(6), 1097-1103.

Lombrana, J., Rodríguez, R. & Ruiz, U., 2010. *Microwave drying of sliced mushroom. Analysis of temperature control and pressure.*

Mahanti, N. K., Chakraborty, S. K., Sudhakar, A., Verma, D. K., Shankar, S., Thakur, M., Singh, S., Tripathy, S., Gupta, A. K., & Srivastav, P. P. (2021). Refractance Window™-Drying vs. other drying methods and effect of different process parameters on quality of foods: A comprehensive review of trends and technological developments. *Future Foods*, 3, 100024. <https://doi.org/10.1016/J.FUFO.2021.100024>

Menon, A., Stojceska, V. & Tassou, S., 2020. *A systematic review on the recent advances of the energy efficiencies improvements in non conventional food drying technologies*, London.

Mihalcea, L. I., Bucur, F. C., Cantaragiu, A. M. M., Gurgu, L. C., Borda, D. D., & Iordachescu, G. S. (2016). Temperature influence on the *Agaricus bisporus* mushrooms dehydration process. *Scientific Study & Research. Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry*, 17(4), 323.

Moreiras y otros, 2013. *Composición nutricional Agaricus bisporus*. Consenso de la Sociedad Española de Nutrición Comunitaria.

Morales, J., & Vélez-Ruiz, J. F. (2014). Deshidratación de frutas y hortalizas por Ventana Refractiva®. *Reciteia Rev. Revis. La Ciencia, Tecnol. E Ing. Los Aliment*, 13, 69-75.

Mugi, V. R., & Chandramohan, V. P. (2021). Shrinkage, effective diffusion coefficient, surface transfer coefficients and their factors during solar drying of food products—A review. *Solar Energy*, 229, 84-101.

Nayak, B. y otros, 2011. *Colored potatoes dried for antioxidant-rich value added foods.*

Nindo, C. e. a., 2003. *Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system. Journal Processing and Preservation.*

Nindo, C. y otros, 2003. *Energy utilization and microbial reduction in a new film drying system.*

Nindo, C. & Tang, J., 2007. *Refractance window dehydration technology: a novel contact drying method.*

Núñez, H., Jaques, A., Belmonte, K., Córdova, A., Lafuente, G., & Ramírez, C. (2023). Effect of CO₂ Laser Microperforation Pretreatment on the Dehydration of Apple Slices during Refractive Window Drying. *Foods*, 12(11), 2187.

Ochoa-Martínez, C., Quintero, P., Ayala, A. & Ortiz, M., 2012. *Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window technique.*

- Ocoro-Zamora, M. & Ayala-Aponte, A., 2013. *Influence of thickness on the drying of papaya puree through refractance window technology*.
- Okos, M. y otros, 2007. *Food dehydration. Handbook of Food Engineering*, Florida, USA.
- Orphanides, A., Goulas, V. & Gekas, V., 2016. *Drying technologies; vehicle to high-quality herbs. Food Eng.*
- Palma, I. G., José, F. M. P. R. M., Escalona, S. M. H. B., & Santos, G. D. G. J. S. ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE DE DIFERENTES ESPECIES DE HONGOS COMESTIBLES.
- Pardo, A., González, J. E. P., Descalzo, J. J. P., & De Juan, A. J. (2004). Assesment of different casing materials for use as peat alternatives in mushroom cultivation: evaluation of quantitative and qualitative production parameters. *Spanish Journal of Agricultural Research*, (2), 267-272.
- Quitral, V., Sepulveda, M., Schwartz, M. & Kern, W., 2014. *Antioxidant capacity and total polyphenol content in different apple varieties cultivated in Chile*. Santiago.
- Raghavi, L., Moses, J. & Anandharanarkrishnan, C., 2018. *Refractance window drying of foods*.
- Ramírez, C. y otros, 2022. *Mathematical modeling to estimate furan formation in thermally processed foods: A preliminary analysis considering carrots as a model food*.
- Reyes, A., Mahn, A., Cubillos, F., & Huenulaf, P. (2013). Mushroom dehydration in a hybrid-solar dryer. *Energy conversion and management*, 70, 31-39.
- Rhim, J. W., & Lee, J. H. (2011). Drying kinetics of whole and sliced shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*). *Food Science and Biotechnology*, 20, 419-427.
- Robaszkiewicz, A., Bartosz, G., Ławrynowicz, M., & Soszyński, M. (2010). The Role of Polyphenols, β -Carotene, and Lycopene in the Antioxidative Action of the Extracts of Dried, Edible Mushrooms. *Journal of nutrition and metabolism*, 2010.
- Sánchez, C., Pascual, S., Ancos, B. & Cano, P., 2010. *Nutritional values of fruits*. , s.l.: s.n.
- Sánchez, J., Benavides, J. & Basilio, J., 2013. *The Folin-Ciocalteu assay revisited: Improvements of its specificity for the phenolic content determination*.
- Simpson, R. y otros, 2017. *Understanding the success of Pages model and related empirical equations in fitting experimental data of diffusion phenomena in food matrices* , Valparaíso.
- Soysal, Y., 2004. *Microwave drying characteristics of parsley. Biosystems Engineering*.
- Spoelstra, S., de Smidt, R. & Wemmers, A., 2017. *Thin Film Drying Processes Energy and economic aspects compared to spray drying*.
- Sun, L., Bai, X., & Zhuang, Y. (2014). Effect of different cooking methods on total phenolic contents and antioxidant activities of four *Boletus* mushrooms. *Journal of food science and technology*, 51, 3362-3368.
- Supriya Yadav and Jude Wilson. “Antioxidant and Ergothioneine Assessment of Nutritionally Enriched *Agaricus bisporus* Powders”. *EC Nutrition* 17.1 (2022): 63-80.

Torres-León, C., Rojas, R., Serna-Cock, L., Belmares-Cerda, R., & Aguilar, C. N. (2017). Extraction of antioxidants from mango seed kernel: Optimization assisted by microwave. *Food and Bioproducts Processing*, 105, 188-196.

Tridge, 2021. 2020 Industry Report: Mushroom.

Vadivambal, R. & Jayas, D., 2011. *Applications of thermal imaging in agriculture and food industry*.

Wang, J. & Xi, Y., 2005. *Drying characteristics and drying quality of carrot using a two-stage microwave process*.

Zhang, M., Tang, J., Mujumdar, A. & Wang, S., 2006. *Trends in microwave related drying of fruits and vegetables*.

CAPÍTULO VII

ANEXOS

8. Anexos

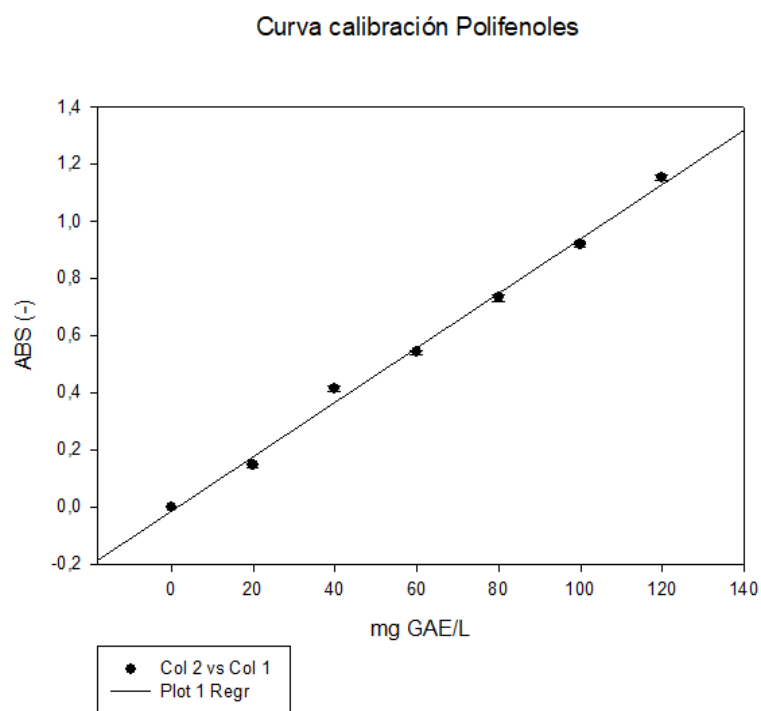
- Anexo 1: Contenido de SST y textura

Condiciones de secado	Sólidos solubles totales (g Xsst/g BS)	Textura (N)
Materia prima	0.20 ± 0.01 ^a	38.24 ± 0.62 ⁱ
VR 80°C	0.35 ± 0.01 ^c	19.54 ± 0.06 ^b
MW 80°C P=90W	0.31 ± 0.01 ^b	21.42 ± 0.05 ^{e,f}
MW 80°C P= 180W	0.37 ± 0.01 ^{d,e}	21.12 ± 0.04 ^{d,e}
MW 80°C P=360W	0.38 ± 0.02 ^{e,f}	21.01 ± 0.07 ^d
VR 90°C	0.42 ± 0.01 ^g	19.93 ± 0.09 ^c
MW 90°C P=90W	0.32 ± 0.01 ^b	22.03 ± 0.07 ^g
MW 90°C P=180W	0.36 ± 0.01 ^{c,d}	21.49 ± 0.05 ^f
MW 90°C P=360W	0.40 ± 0.02 ^{f,g}	21.39 ± 0.03 ^{e,f}
Tunel de secado	0.38 ± 0.02 ^{d,e}	8.33 ± 0.05 ^a
Liofilizado	0.42 ± 0.01 ^g	28.79 ± 0.04 ^h

- Anexo 2: Polifenoles totales y capacidad antioxidante

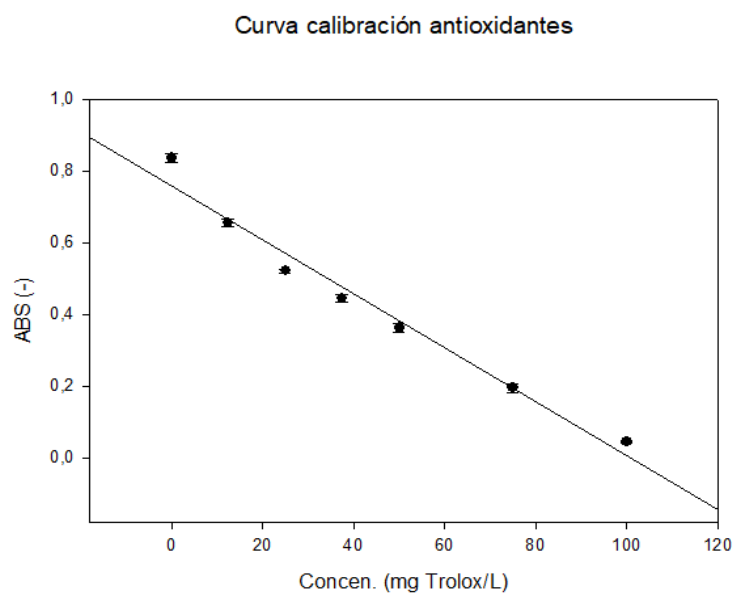
Condiciones de secado	PFT (mg GAE/g BS)	Capacidad antioxidante (mg Trolox/g BS)
Materia prima	9.19 ± 0.77 ^g	5.74 ± 0.61 ^c
VR 80°C	6.36 ± 0.24 ^c	3.24 ± 0.28 ^b
MW 80°C P=90W	5.73 ± 0.35 ^b	2.09 ± 0.43 ^a
MW 80°C P= 180W	6.69 ± 0.20 ^{c,d}	3.56 ± 0.34 ^b
MW 80°C P=360W	7.57 ± 0.35 ^f	3.87 ± 0.48 ^b
VR 90°C	6.95 ± 0.20 ^{c,d,e}	3.47 ± 0.14 ^b
MW 90°C P=90W	5.16 ± 0.27 ^{a,b}	2.04 ± 0.67 ^a
MW 90°C P=180W	6.64 ± 0.35 ^c	3.65 ± 0.56 ^b
MW 90°C P=360W	7.26 ± 0.28 ^{d,e,f}	3.47 ± 0.35 ^b
Tunel de secado	4.65 ± 0.14 ^a	1.56 ± 0.28 ^a
Liofilizado	7.44 ± 0.40 ^{e,f}	5.24 ± 0.28 ^c

- Anexo 3: Curva calibración polifenoles totales



$$y = 0.0095x - 0.0125 \quad ; \quad R^2 = 0.9955$$

- Anexo 4: Curva calibración capacidad antioxidante



$$y = -0.0075x + 0.76 \quad ; \quad R^2 = 0.9742$$