UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Repositorio Digital USM **https://repositorio.usm.cl**

Tesis USM TESIS de Pregrado de acceso ABIERTO

2022-06

Efecto de la aplicación de perforación láser co2 en el desarrollo de un snack de manzana en ventana refractiva

Lafuente Gómez, Germán Ignacio

https://hdl.handle.net/11673/53873

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL

VALPARAISO-CHILE

EFECTO DE LA APLICACIÓN DE PERFORACIÓN LÁSER CO_2 EN EL DESARROLLO DE UN SNACK DE MANZANA EN VENTANA REFRACTIVA.

GERMÁN IGNACIO LAFUENTE GÓMEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE INGENIERIO CIVIL QUÍMICO

PROFESOR GUIA: Ms. HELENA NUÑEZ

PROFESOR CO-REFERENTE: Dr. CRISTIAN RAMIREZ

PROFESOR CO-REFERENTE: Dr. ALDONZA JAQUES

VALPARAISO, junio de 2022

RESUMEN

Hoy en día, existe un interés en el consumo de productos alimenticios saludables y de alta calidad. Las frutas son un producto básico en las dietas, pero algunas presentan una disponibilidad limitada. Por ello, las frutas deshidratadas son de gran interés, ya que permiten mejorar su vida útil, disminuir costo de transporte y almacenamiento, además de estar disponible durante todo el año. En este sentido, la ventana refractiva (VR) es una tecnología de secado novedosa, que permite obtener productos de alta calidad, presenta un alta eficiencia energética y tiempo de operación menores. Por otro lado, la aplicación de microperforaciones con láser CO_2 es una tecnología innovadora que permite mejorar la transferencia de materia, reduciendo los tiempos de secado sin contaminación cruzada.

En la presente investigación, se busca evaluar el efecto de aplicación de microperforación con tecnología de láser CO_2 en el secado de un snack de manzana *Granny Smith* en ventana refractiva, a través de la evaluación de solidos solubles totales, color, textura, capacidad antioxidante y contenido de polifenoles totales.

Se realizó un diseño experimental en donde rodajas de manzana de 4 mm de espesor y 40 mm de diámetro se microperforaron con un láser de CO_2 con 3 diámetros de poro (200, 400 y 600 µm) y 3 densidades de poro (9, 16 y 25 poros/cm^2). El secado en ventana refractiva se realizó a 70, 80 y 95 °C, además se utilizó como controles el secado en túnel y liofilización. Algunas muestras secas fueron seleccionadas para un estudio de almacenamiento acelerado a 45 °C con una humedad relativa de 75%.

Los resultados obtenidos, muestran que la ventana refractiva a 95 °C presenta una retención de las propiedades de las muestras sin microperforar similares al liofilizado, exceptuando la dureza. Además, el tratamiento que presenta el mejor resultado en términos de contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante corresponde a una configuración que presenta una temperatura de secado de 95 °C, un diámetro de 600 µm y/o densidad de poro de 25 poros/cm^2. Por otro lado, en el almacenamiento, esta configuración presenta una degradación de la capacidad antioxidantes y del contenido de polifenoles totales, así como alteración del color, más acelerada en comparación a otra configuración. Dado lo anterior, una configuración de diámetro y densidad de poro baja (200 o 400 µm y 9 poros/cm^2), secadas a una temperatura de operación de 70 °C, es una alternativa interesante y factible, ya que permite disminuir el tiempo de secado de manera significativa, manteniendo así las propiedades en términos de color, capacidad antioxidante y contenido de polifenoles totales después del secado y durante un almacenamiento prolongado.

Por tanto, se puede concluir que el uso de microperforaciones con láser CO_2, a un mayor diámetro y densidad de poro, mejora la retención de capacidad antioxidante y contenido de polifenoles total. Por otro lado, un menor diámetro y densidad de poro, más una temperatura de secado menor, mejora la retención de la capacidad antioxidante, el contenido de polifenoles totales y diferencia de color a lo largo del tiempo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN....2
ÍNDICE DE CONTENIDOS....3
ÍNDICE DE TABLAS....6
ÍNDICE DE FIGURAS....6
1. INTRODUCCION....10
1.1 Objetivos....12
1.1.1 Objetivo general....12
1.1.2 Objetivo especifico....12
2. ANTECEDENTES....13
2.1 Manzana (*Granny Smith*)....13
2.2 Mercado....14
2.2.1 Mercado nacional....14
2.3 Procesos de deshidratación....16
2.3.1 Ventana refractiva....17
2.3.2 Túnel de secado....20
2.3.3 Liofilización....21
2.4 Microperforación con láser CO_2....23
2.5 Almacenamiento acelerado....24
2.6 Parámetros de calidad alimentaria....26
2.6.1 Actividad de agua....26
2.6.2 Color....28
2.6.3 Textura....29
2.6.4 Capacidad antioxidante y contenido total de polifenoles....30
3. MATERIALES Y METODOS....33
3.1 Materia prima....33

3.2 Equipos 34
3.2.1 Laser CO_2 34
3.2.2 Deshidratación por ventana refractiva.....38
3.2.3 Deshidratación por secado convencional 38
3.2.4 Deshidratación por Liofilizador.....39
3.2.5 Ensayo de almacenamiento acelerado.....40
3.3 ANALISIS DE PROPIEDADES 41
3.3.1 Determinación de humedad 41
3.3.2 Determinación de actividad de agua 42
3.3.3 Determinación de color 42
3.3.4 Determinación de textura.....43
3.3.5 Determinación de solidos solubles totales.....44
3.3.6 Determinación del contenido de polifenoles totales 45
3.3.7 Capacidad antioxidante 46
3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL 48
3.5 ANALISIS ESTADISTICO.....49
4. RESULTADOS 50
4.1 MUESTRAS CON MICROPERFORACION LASER Y EXPERIMENTOS CONTROLES 50
4.1.1 Curva de actividad de agua.....50
4.1.2 Humedad.....54
4.1.3 Actividad de agua.....55
4.1.4 Solidos solubles totales.....56
4.1.5 Color.....58
4.1.6 Textura.....60
4.1.7 Capacidad antioxidante 62

4.1.8 Contenido de polifenoles totales 64
4.2 ALMACENAMIENTO ACELERADO 68
4.2.1 Criterio para selección de muestras 68
4.2.2 Cambio visible en las muestras en el tiempo 68
4.2.3 Humedad 69
4.2.4 Actividad de agua 71
4.2.5 Solidos solubles totales 72
4.2.6 Color 73
4.2.7 Textura 75
4.2.8 Capacidad antioxidante 77
4.2.9 Contenido de polifenoles totales 78
5. CONCLUSIONES 81
6. RECOMENDACIONES 82
7. REFERENCIA 83
8. ANEXO 88
8.1 RESULTADOS DE MUESTRAS CON MICROPERFORACION LASER CO_2 88
8.2 RESULTADOS DE MUESTRAS EN ALMACEMIENTO ACELERADO 90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante diferentes variedades de manzanas comercializadas en España (Adaptado de (Ruiz-Torralba et al., 2018)).....14
Tabla 2 Comparación del consumo energético de la ventana refractiva con otras técnicas de secado. (Adaptado de (Raghavi et al., 2018) y (Nindo & Tang, 2007)). 19
Tabla 3 Ventajas y desventajas del proceso de liofilizado (Soham, 2011).....23
Tabla 4 Recomendación de temperatura para ensayo de almacenamiento acelerado para diferentes productos (Howard R. Moskowitz, I. Sam Saguy, 2009). 25
Tabla 5 Rango de actividad de agua y crecimiento microbiano para diferentes alimentos (Dong Chen & Mujumdar, 2008). 27
Tabla 6 Criterio de evaluación sensorial de diferencias de color (Dong Chen & Mujumdar, 2008). 29
Tabla 7 Distancia entre poros en configuración panal.....35
Tabla 8 Condiciones de medición y operación del ensayo de textura.....43
Tabla 9 Variables y niveles del diseño experimental. 48
Tabla 10 Diseño experimental a través del modelo de Box-Benhken.....48
Tabla 11 Tiempo de secado de los experimentos controles y experimentos con microperforaciones.....53
Tabla 12 Cambio de apariencia de las muestras perforadas seleccionadas y los experimentos control en el ensayo de almacenamiento acelerado.....69
Tabla 13 Valores promedio de humedad para muestras almacenadas en el tiempo y diferencia porcentual que existe con respeto a la semana 0. 70
Tabla 14 Valores promedio de actividad de agua para muestras almacenadas en el tiempo y diferencia porcentual que existe con respeto a la semana 0. 72
Tabla 15 Valores promedio de diferencia de color para muestras almacenadas en el tiempo y diferencia porcentual que existe con respeto a la semana 0. 74
Tabla 16 Valores promedio de dureza unitaria para muestras almacenadas en el tiempo y diferencia porcentual que existe con respeto a la semana 0. 76
Tabla 17 Valores promedio de capacidad antioxidante para muestras almacenadas en el tiempo y diferencia porcentual que existe con respeto a la semana 0.....77
Tabla 18 Valores promedio de contenido de polifenoles totales para muestras almacenadas en el tiempo y diferencia que existe con respeto a la semana 0. 79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Producción estimada de manzana en Chile.(Oficina de Estudios y Politicas Agrarias, 2021b) (Elaboración propia). 15
Figura 2 Superficie frutícola de manzana planta en Chile (Oficina de Estudios y Politicas Agrarias, 2021b) (Elaboración propia). 15

Figura 3 Diagrama de sistema de secado con ventana refractiva bacth. (Adaptado de Ochoa-Martínez et al., 2012).....17
Figura 4 Esquema de sistema de ventana refractiva con película móvil. (Adaptado de Nindo & Tang, 2007).....18
Figura 5 Diagrama ilustrativo de los mecanismos de transferencias de energía involucrados en la ventana refractiva. (Adaptado de Nindo & Tang, 2007) 19
Figura 6 Esquema representativo de secador industrial de túnel de secado, con configuración co-corriente, contracorriente y recirculacion interna del fujo de aire (Adaptado de Mujumdar, 2020). 20
Figura 7 Variación de la temperatura y humedad en un material durante el proceso de liofilización. (Adaptado de Hua et al., 2010) 22
Figura 8 Diagrama de presión vs temperatura durante el proceso de liofilización. (Adaptado de Nireesha et al., 2013).....23
Figura 9 Espacio cartesiano de color de sistema CIE*L*a*b** (Konica Minolta, 2022)..28
Figura 10 Manzanas *Granny Smith*. 33
Figura 11 Rodaja de manzana. 33
Figura 12 Equipo de laser CO2 modelo SYNRAD TI100. 34
Figura 13 Diagrama de distribución de poros en forma de panal a lo largo de la rodaja. 35
Figura 14 Muestra de rodaja de manzana perforada. 36
Figura 15 Microscopio invertido A.KRUSS Optronic GmbH, modelo MBL3200. 37
Figura 16 Imágenes a través de microscopio invertido para validación de diámetro de poro de 200 µm. 37
Figura 17 Imágenes a través de microscopio invertido para validación de diámetro de poro de 400 µm. 37
Figura 18 Imágenes a través de microscopio invertido para validación de diámetro de poro de 600 µm. 37
Figura 19 Ventana refractiva marca Mermmet, modelo WNB. 38
Figura 20 Túnel de secado. 39
Figura 21 Liofilizador Alpha 2-4 LSCplus. 40
Figura 22 Estufa con control de humedad marca Memmert, modelo HCP-108. 41
Figura 23 Higrómetro marca AquaLab, modelo Serie 4TE. 42
Figura 24 Colorímetro marca Konica Minolta, modelo CR-400. 42
Figura 25 Texturómetro marca Brookfield, modelo CT3. 44
Figura 26 Refractómetro digital marca Hanna Instruments, modelo HI-96811. 44
Figura 27 Espectrofotómetro UV/Vis Genesys 5, modelo Optimizen Pro. 45
Figura 28 Curva de calibración para análisis de polifenoles totales. 46
Figura 29 Curva de calibración para análisis de capacidad antioxidante. 47
Figura 30 Curva de actividad de agua en ventana refractivo a 70°C en muestra con microperforaciones y experimento control. 50

Figura 31 Curva de actividad de agua en ventana refractivo a 80°C en muestra con microperforaciones y experimento control. 51
Figura 32 Curva de actividad de agua en ventana refractivo a 95°C en muestra con microperforaciones y experimento control. 51
Figura 33 Curva de actividad de agua en túnel de secado a 70°C. 52
Figura 34 Tiempos de secado obtenidos en muestra con microperforaciones y experimentos control. 53
Figura 35 Muestras con microperforaciones en materia prima fresca enumeradas de acuerdo con el experimento que le corresponde. 54
Figura 36 Muestras con microperforaciones después del secado, enumerados de acuerdo con el experimento que le corresponda. 54
Figura 37 Humedad obtenida en muestra con microperforaciones y experimentos control. 55
Figura 38 Actividad de agua obtenido en muestra con microperforaciones y experimentos control. 56
Figura 39 Solidos solubles totales obtenido en muestra con microperforaciones y experimentos control. 57
Figura 40 Diferencia de color obtenida en muestra con microperforaciones y experimentos control. 58
Figura 41 Diagrama de Pareto estandarizado para diferencia de color. 59
Figura 42 Superficie de respuesta de diferencia de color en muestra con microperforaciones. 60
Figura 43 Textura unitaria obtenida en muestra con microperforaciones y experimentos control. 61
Figura 44 Capacidad antioxidante obtenida en muestra con microperforaciones y experimentos control. 62
Figura 45 Diagrama de Pareto estandarizado para capacidad antioxidante. 63
Figura 46 Superficie de respuesta de capacidad antioxidante en muestra con microperforaciones en unidades de µmol de Trolox equivalente por gramo de masa seca. 64
Figura 47 Contenido de polifenoles totales obtenida en muestra con microperforaciones y experimentos control. 65
Figura 48 Diagrama de Pareto estandarizado para el contenido de polifenoles totales. ..66
Figura 49 Superficie de respuesta de contenido de polifenoles totales en muestra con microperforaciones en unidades de miligramos de ácido gálico equivalente por gramo de masa seca. 66
Figura 50 Humedad obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo. 70
Figura 51 Actividad de agua obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo. 71

Figura 52 Solidos solubles totales obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo.73
Figura 53 Diferencia de color obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo.74
Figura 54 Textura unitaria obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo.76
Figura 55 Capacidad antioxidante obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo.77
Figura 56 Contenido de polifenoles totales obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo. 79

1. INTRODUCCION

Las frutas entregan una nutrición básica en conjunto con beneficios significativos para la salud de los humanos, pero muchas de estas frutas son producidas estacionalmente y, por tanto, no pueden estar disponibles para los consumidores durante todo el año. Por lo mismo, en las frutas secas existe una oportunidad para consumidores, ya que, al eliminar la mayor cantidad de contenido de agua a través de diversas técnicas de secado, se concentran los nutrientes que contienen, disminuyen los costos de almacenamiento y de transporte, aumenta su vida útil y mejoran la estabilidad a las reacciones químicas y la actividad microbiana.

Dado lo anterior, las frutas secas son una alternativa interesante, ya que son una fuente rica en sustancias y nutrientes esenciales que promueven una mejor salud. Estos "snack" pueden ejercer varios efectos sobre la salud de los humanos, gracias a la combinación sinérgica de sus nutrientes y compuestos bioactivos, en particular en enfermedades tales como la obesidad, la diabetes tipo II, la osteoporosis, las enfermedades cardiovasculares, entre otros (Keast et al., 2011).

Una de las frutas más consumidas en el mundo es la manzana, en distintas variedad y productos (Vasylieva & James, 2021), la cual presenta una estabilidad nutricional a lo largo de un periodo prolongado en la postcosecha (Saftner et al., 2005). Además, son una excelente fuente de nutriente y fitocomponentes, las que, de acuerdo con estudios epidemiológicos, están relacionados con la reducción en el riesgo de contraer diversas enfermedades (Boyer & Liu, 2004; Donno et al., 2019; Hyson, 2011).

La deshidratación es unos de los métodos más comunes para la preservación de los productos agrícolas y la extensión de la vida útil de las frutas (Donno et al., 2019), ya que permite reducir a la actividad de agua presente en ellos. Hoy en día, el proceso más común de secado industrial de alimentos es secado por convección o secado convencional, el cual es un secado de primera generación y consiste en un secado a través de un gas caliente, generando un contacto solido-gas entre el producto y la corriente, desplazando el agua presente en el sólido hacia la corriente gaseosa, por medio de un gradiente de presión de vapor del agua. A pesar de que este proceso es utilizado en el 85% de la industria alimentaria (Zarein et al., 2015), los métodos de secado convencional presenta una calidad del producto obtenido inferior, además de presentar altos tiempo de secado y baja eficiencia térmica (Raghavi et al., 2018). Las tecnologías de secado de segunda generación son aquellas que permiten secar productos en forma de pastas o lodos, tales como el secado spray y el tambor de secado. Por otro lado, el secado por liofilización es una tecnología de secado de tercera generación ya que presenta un operación baja temperatura (Vega-Mercado et al., 2001); el agua presente en el alimento es congelada por debajo de la temperatura eutéctica o temperatura de transición vítrea hasta que esté completamente sólido, para ser removida a una presión reducida (por debajo de la presión atmosférica) y una temperatura de operación baja ,a través de la sublimación del agua congelada; este proceso permite obtener producto de alta calidad ya que, al operar en temperatura bajas, no produce una degradación de los componentes del alimento por la exposición térmica, por lo que no se produce una reducción nutricional ni un

degradación sensorial (Ratti, 2001). Pese a lo anterior, el proceso de liofilizado presenta alto costo capital y altos costos operacionales.

Por lo mismo, existe una necesidad en la mejora de la eficiencia de los procesos en la industria, así como de satisfacer las exigencias por parte de los consumidores en el mercado, demandando una mejor calidad sensorial y nutricional en sus alimentos. En este contexto, las nuevas tecnologías de secado son una alternativa novedosa e interesante, que combinan la eficiencia en los procesos como la retención de los parámetros de calidad en los alimentos. Así, la ventana refractiva es una tecnología de secado de cuarta generación, la cual consiste en un baño termorregulado en el que se dispone una lámina de Mylar sobre la superficie del agua, donde se colocan las muestras de alimentos que se requieren secar. Esta tecnología tiene por características una alta eficiencia térmica (Nindo & Tang, 2007; Raghavi et al., 2018) y una alta retención de la calidad del producto (Ochoa-Martínez et al., 2012).

La reducción de los tiempos de operación es clave para la mejora en la productividad de cualquier industria, por lo que varias tecnologías han sido estudiadas para mejorar la transferencia de materia y calor, como impregnación a vacío (Figueroa et al., 2020), campos eléctricos (Olivares et al., 2021) y microperforación láser CO_2 (Araya et al., 2022; Ferraz et al., 2007; Figueroa et al., 2020; Fujimaru et al., 2012; Olivares et al., 2021; Silva-Vera et al., 2020). El láser de CO_2 es un equipo que genera un haz de luz monocromático, coherente y direccional que permite hacer pequeñas perforaciones a lo largo de una superficie, provocando así un daño mínimo, sin contacto mecánico con el material (Fujimaru et al., 2012). Esta tecnología es una propuesta interesante para la industria de los alimentos, ya que permite una longitud de onda cuya energía es absorbida en gran cantidad por el agua, no genera contaminación cruzada y permite un aumento del área de transferencia de materia y calor en el secado sin dañar áreas adyacentes en dónde es aplicada (Fujimaru et al., 2012)

Hoy, los diferentes desafíos en el desarrollo de snacks nutritivos y novedosos requieren un análisis en el tiempo de la calidad, la aceptabilidad por los consumidores y la vida útil del producto. Por ello, el ensayo de almacenamiento acelerado o vida útil acelerada es una prueba de gran utilidad, ya que, modificando las condiciones de temperatura y humedad relativa en un almacenamiento convencional, se puede observar el deterioro acelerado de las propiedades del producto en un tiempo reducido, permitiendo detectar los cambios sensoriales, bioquímicos y físicos del producto a lo largo de un tiempo prolongado.

Esta investigación se encuentra desarrollada dentro de los proyectos **FONDECYT-1181270** (Dr. Ricardo Simpson) y **FONDECYT-1191280** (Dr. Cristian Ramírez), los cuales apoyaron financieramente su realización.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

El objetivo principal de esta investigación es determinar el efecto de la aplicación de microperforaciones con tecnología láser CO_2 en el secado de un snack de manzana (*Granny smith*) en ventana refractiva, a través de la evaluación de la capacidad antioxidantes, el contenido de polifenoles totales, color y textura antes y después del secado. Aparte, se busca compara con experimentos controles, tales como la ventana refractiva sin microperforaciones, túnel como secado convencional y liofilizador.

Además, se pretende evaluar el comportamiento de determinadas muestras con microperforaciones a lo largo del tiempo, observando la degradación de sus componentes y a las alteraciones de sus propiedades, a través de un ensayo de almacenamiento acelerado.

1.1.2 Objetivo especifico

- Definir condiciones experimentales para el proceso de secado en túnel y liofilizador.
- Determinar condiciones de microperforación laser para 3 densidad de poros (9,16 y 25 poros/cm^2) y 3 diámetros de poros (200, 400 y 600 µm).
- Realizar un estudio de vida útil acelerada para el almacenamiento de los productos deshidratados, a una temperatura de 45 °C y humedad relativa de 75%.
- Evaluar las variaciones en las propiedades del producto obtenido del secado y después del almacenamiento, a través de la medición de solidos solubles totales, capacidad antioxidante, contenido polifenoles totales, color y textura.
- Comparar los resultados obtenido mediante ventana refractiva con procesos de túnel de secado y liofilizador.

2. ANTECEDENTES

2.1 Manzana (*Granny Smith*)

La manzana (Malus domestica [Suckow] Borkh) es, económica y culturalmente, una de las frutas más importante en el mundo actual, la cual crece en todas las zonas templadas. Con más de mil variedades locales reconocida, la manzana moderna proporciona una caso único de estudio para comprender la evolución de las plantas bajo el cultivo humano (Spengler, 2019).

De las diferentes variedades de manzanas, una de las más famosa es la manzana *Granny Smith*. Aunque ninguna especie de Malus domestica es nativa de Australia, desde los tiempos coloniales se han ido naturalizando. Maria Ann Smith (1799–1870), de Peasmarsh, Sussex, Reino Unido, había llegado a Australia en noviembre de 1838. Su esposo, Thomas, compró un terreno en lo que ahora es Eastwood, en 1855 y 1856. Según se relata, la Sra. Smith regresó de Sydney Markets con algunas cajas de ginebra, que habían contenido los restos podridos de algunas manzanas 'French Crab' de Tasmania. Ella vertió el desorden en un arroyo en su tierra y, en 1868, pudo mostrar a los visitantes el árbol resultante del cual se derivaron todos los manzanos *'Granny Smith*' (Mabberley et al., 2001).

La manzana *Granny Smith* es una manzana color verde brillante, de tamaño mediano a grande y de forma redonda. Presenta una carne color blanco brillante y una textura crujiente. Su sabor característico es acido, con un sutil dulzor.

La manzana es ampliamente consumida y son una abundante fuente de fitoquímicos, tales como los polifenoles (como los flavonoides), así como de vitaminas y minerales. Dado la presencia de estos compuesto y su capacidad antioxidante, estudios epidemiológicos relacionan el consumo de manzana con una reducción del riesgo de contraer algunos tipos de cáncer, problemas cardiovasculares, asma y diabetes (Boyer & Liu, 2004). En la **Tabla 1** se expone el contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante de diferentes variedades de manzanas comercializadas en España, determinada a través de diversas metodologías.

Tabla 1 Contenido de polifenoles totales y capacidad antioxidante diferentes variedades de manzanas comercializadas en España (Adaptado de (Ruiz-Torralba et al., 2018)).

Fruta	FRAP (µmol TE/ 100g MF)	FRAP (µmol Fe2+/ 100g MF)	TEAC (µmol TE/100g MF)	DPPH (µmol TE/100g MF)	TPC (mg GAE/ 100g MF)
Manzana var. *Golden* (con piel)	92.5 ± 4.47	164 ± 5.16	142 ± 3.84	52.9 ± 2.02	197 ± 4.92
Manzana var. *Golden* (sin piel)	39.3 ± 0.675	72.5 ± 1.99	95.2 ± 3.21	36.1 ± 1.60	176 ± 5.05
Manzana var. *Granny Smith* (con piel)	98.2 ± 4.74	230 ± 1.78	143 ± 4.98	97.4 ± 6.71	120 ± 1.42
Manzana var. *Granny Smith* (sin piel)	9.50 ± 0.295	18.5 ± 0.2	70.3 ± 4.54	85.9 ± 1.18	79 ± 2.56
Manzana var. *Red delicious* (con piel)	99.5 ± 0.721	183 ± 4.71	291 ± 9.19	83.9 ± 4.15	149.5 ± 9.1
Manzana var. *Red delicious* (sin piel)	27.6 ± 1.56	56.6 ± 0.1	86.3 ± 2.51	75.7 ± 3.80	56.5 ± 3.51

*MF: Masa fresca; FRAP: Ensayo de poder antioxidante reducto de iones férricos; TEAC: Ensayo de capacidad antioxidante de equivalente de Trolox, DPPH: Ensayo de eliminación de radicales 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo, TPC: Contenido de polifenoles totales.

La manzana, en particular la variedad *Granny Smith*, es una fruta que presenta una estabilidad prolongada de sus propiedades sensoriales y bioquímicas durante la postcosecha (Saftner et al., 2005). Esto hace que sea una matriz interesante para el análisis de los efectos de las unidades de procesos en la industria y sus investigaciones, dado que presenta una baja variabilidad entre muestras fresca.

2.2 Mercado

2.2.1 Mercado nacional

En Chile, la tierra ocupada para la producción de manzana corresponde a un 8.8% (30967,34 hectáreas) del total de tierra destinadas al cultivo frutícola, de las cuales el 63.4% se encuentra en la región del Maule y el 20.6% en la región Libertador Bernardo O'Higgins. Entre los manzanos, predomina el cultivo de manzana roja por sobre el de manzana verde, como se puede ver en la **Figura 2**. Así, desde 1989 hasta 2004, la producción de manzana en Chile ha crecido un 85.7%, como se aprecia en la **Figura 1** (Oficina de Estudios y Politicas Agrarias, 2021b).

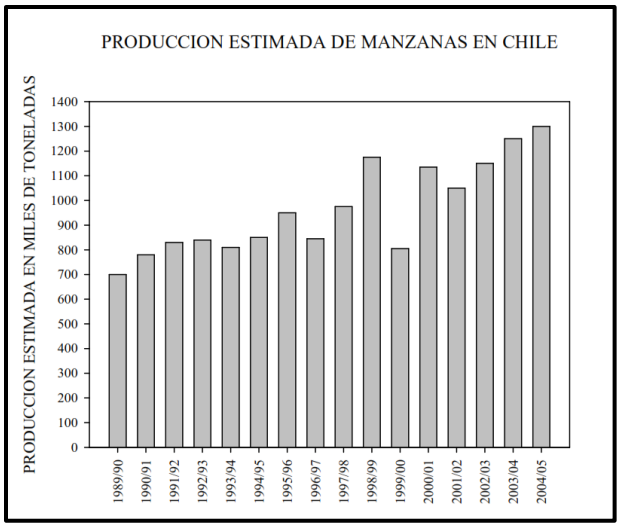


Figura 1 Producción estimada de manzana en Chile.(Oficina de Estudios y Politicas Agrarias, 2021b) (Elaboración propia).

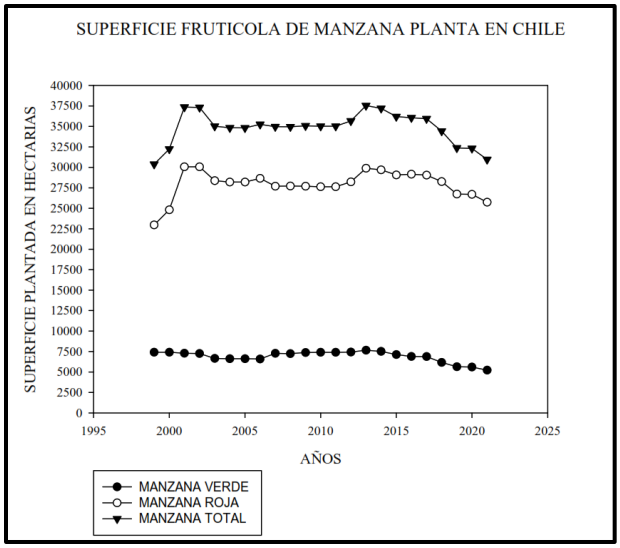


Figura 2 Superficie frutícola de manzana planta en Chile (Oficina de Estudios y Politicas Agrarias, 2021b) (Elaboración propia).

Chile presenta una exportación diversificada entre manzana fresca, manzana deshidratada y otros productos (jugo de manzana, congelados y enlatados), la cual es, aproximadamente, de 777 mil toneladas, al 2020. En total, el valor de la exportación de manzana equivale a 728 millones de dólares estadounidenses (FOB incluido), aproximadamente. (Oficina de Estudios y Politicas Agrarias, 2021a). El 85% de la exportación pertenece a manzana fresca, lo que corresponde a 588 millones de dólares estadounidenses (FOB incluido), aproximadamente. La manzana deshidratada equivale a 1% de los productos exportados derivados de la manzana, lo que equivale a 27 millones de dólares estadounidenses (FOB incluido), aproximadamente. (Oficina de Estudios y Politicas Agrarias, 2021a).

2.3 Procesos de deshidratación

En la industria de alimentos, uno de los procesos utilizados para extender la vida útil de los alimentos es la deshidratación, el cual tiene como principal objetivo prevenir la proliferación de microrganismo y reacciones bioquímicas que puedan afectar la calidad de los alimentos. El proceso de secado se describe como un proceso de transferencia de materia y calor que remueve la humedad presente en los alimentos, obteniendo un producto final en distintos formatos (tales como hojuelas, lamina, pólvora o gránulos). Este proceso es una operación unitaria que presenta un consumo energético intensivo, el cual se estima que corresponde entre un 12 - 20% del consumo de energía total en la industria (Raghavi et al., 2018). Los productos finales obtenidos son más estables a la contaminación microbiana y al deterioro por reacción químicas, además de presenta una mayor facilidad en el almacenamiento y permite minimizar los costos de transporte y almacenamiento.

El método de secado más comúnmente usado en la historia fue el secado al sol. Este tipo de secado presentaba una serie de dificultades para controlar el proceso, ya que, al producirse en contacto directo con el ambiente, existían cambios en la temperatura y humedad a lo largo del día. Además, presentaba tiempo de proceso largo y existía la posibilidad de que el alimento se contaminara por el contacto con el ambiente (proveniente del polvo, la tierra y de los insectos). Ese método es un proceso poco eficiente en su operación como en la calidad del producto final obtenido (İzli, 2017).

En la actualidad, se ha investigado e implementado otras formas de secado para reducir los problemas anteriormente expuestos. Hoy en día, el proceso más común de secado industrial de alimentos es el secado por convección o secado convencional, el cual consiste en un secado a través de un gas caliente, generando un contacto solido-gas entre el producto y la corriente, desplazando el agua presente en el sólido hacia la corriente gaseosa, por medio de un gradiente de presión de vapor del agua. A pesar de que este proceso es utilizado en el 85% de la industria alimentaria (Zarein et al., 2015), los métodos de secado convencional presenta una calidad del producto obtenido inferior, además de presentar altos tiempo de secado y baja eficiencia térmica (Raghavi et al., 2018).

Por lo mismo, existe un gran interés en el desarrollo de tecnologías alternativas al proceso secado convencional, que consideren la capacidad operacional, el tiempo de operación requerido, los costos económicos, la calidad del producto obtenido, la seguridad y el aspecto medioambiental. En este contexto, las nuevas tecnologías de secado son una combinación entre las necesidades presentadas en la industria con las exigencias del mercado y sus consumidores.

Las tecnologías de secado se pueden clasificar de acuerdo con la primera, segunda, tercera y cuarta generación. En las tecnologías de primera generación se encuentran los secadores de horno, de tren de bandejas, de flujo rotario y túnel, las cuales se caracterizan por ocupar aire caliente como medio de transferencia de materia y calor; estos procesos son categorizados como secado convencional y es una buena opción para gránulos y horticultivos. La segunda generación

engloba a los secadores de tambor y spray, los cuales son un método para el secado de pastas y lodos, obteniendo productos finales en forma de hojuelas y polvos. Las tecnologías de liofilizado y deshidratación osmótica se encuentran clasificadas como tecnología de secado de tercera generación, en donde se presentan secados a baja temperatura (Vega-Mercado et al., 2001). Los secados por microondas, secado con infrarrojo, secador de bomba de calor, secado de lecho fluidizado, secado por radio-frecuencia y ventana refractiva son considerado como tecnologías de secado de cuarta generación, las cuales se caracteriza por la retención de la calidad en comparación con la materia prima (Chou & Chua, 2001).

2.3.1 Ventana refractiva

La ventana refractiva (RW^{TM}) es una tecnología patentada por Magoon (1986) y desarrolla por MCD Technologies Inc. (Tacoma Washington, USA). Se clasifica como una tecnología de secado de cuarta generación y es conocida por entregar un producto final (en forma de polvo o hojuelas) con una calidad superior, en tiempos de operación y costos operacionales menores en comparación con otras tecnologías de secado convencionales (Ochoa-Martínez et al., 2012).

Los principales componentes que presenta este método de secado es un baño termorregulado de agua como fuente de energía térmica y una material delgado y transparente al infrarrojo (como un vidrio de pyrex) o una película de plástico de poliestireno (como película de Mylar), el cual colocado en la superficie del agua y se disponen los alimentos sobre esta superficie para secar. Esta película puede estar en manera estática o móvil. En la **Figura 3** se muestra un esquema de ventana refractiva en modo batch, el cual presenta un baño termorregulado, un controlador de temperatura y una película transparente. En la **Figura 4** se presenta un esquema del proceso de secado de la ventana refractiva con película móvil, la cual cuenta con una cinta transportador de la película de plástico una campana de extracción de gases, un recirculador de agua caliente (para un control de la temperatura y el nivel del agua que contacta la película) y un sistema de enfriamiento donde se enfría el producto final para ser retirado.

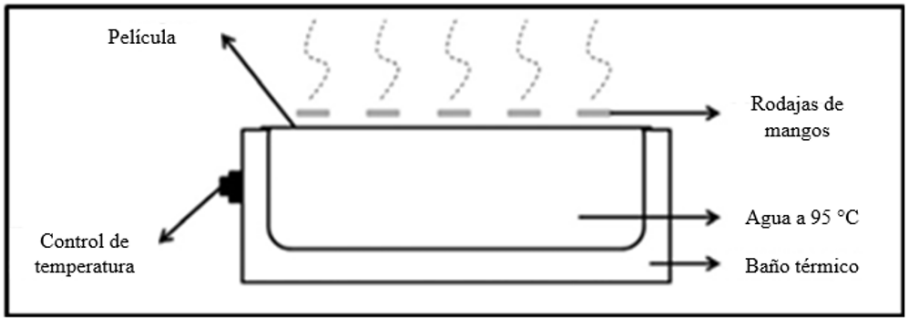


Figura 3 Diagrama de sistema de secado con ventana refractiva bacth. (Adaptado de Ochoa-Martínez et al., 2012)

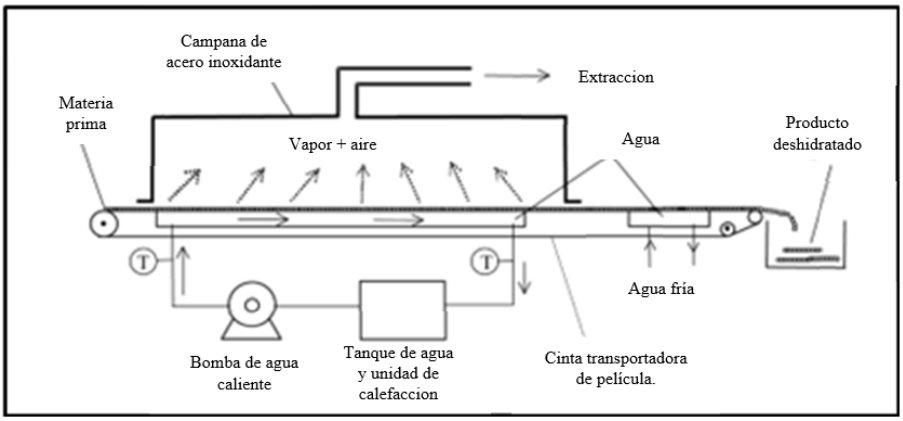


Figura 4 Esquema de sistema de ventana refractiva con película móvil. (Adaptado de Nindo & Tang, 2007)

En los sistemas de ventana refractiva se utiliza recirculación de agua caliente entre 95-97 °C, a presión atmosférica, la cual entrega energía a la materia prima para ser deshidratada. Algunos materiales (como jugos, pures y suspensión) puede ser esparcidos a lo largo de la fina película de plástico, mejorando la transferencia de materia y calor, disminuyendo los tiempos de secado.

Durante el proceso de secado, se presentan los 3 mecanismo de transferencia de calor: transferencia de calor por conducción (q_{cond}), convección (q_{conv}) y por radiación (q_{rad}). En la **Figura 5** se muestras las interacciones que ocurren en el proceso de secado desde el agua caliente hasta el producto. En primer lugar, el agua es calentada por un servicio (como una resistencia eléctrico o vapor) en un estanque aislado y entrega energía a la fina película de plástico. En la interfaz agua-película, la energía es transmitida por la película plástica a través de los mecanismos de conducción y radiación; dado que la temperatura del agua se encuentra por debajo de la temperatura de ebullición de agua y la película transmite en el rango de longitud de onda que coincide con el espectro de absorbancia del agua, se facilita un secado rápido. El mecanismo que involucra la "ventana" ocurre en la interfaz película-producto. La "ventana" permite el paso de la energía infrarroja mediante el material húmedo que se encuentra en la superficie plástica, donde menos de la mitad de la radiación térmica es alcanzando por los alimentos (Zotarelli et al., 2015). La energía entregada al alimento permite que el eleve su temperatura hasta los 74 °C (Castoldi et al., 2015), todo lo anterior dependiendo de la humedad inicial presente en el alimento, el espesor y la consistencia del producto. Cuando el producto pierde su humedad, la "ventana" se cierra y comienza a "refractar" la radiación infrarroja hacia la fuente de agua, incrementando el índice de refracción (Zotarelli et al., 2015). En esta etapa, la transferencia de calor por conducción es predominante y mantiene la evaporación hasta llegar a la humedad critica del producto. En las últimas etapas del secado, ocurre una reducción de la transferencia de calor, lo cual protege al producto de un sobrecalentamiento, gracias a los efectos de enfriamiento por evaporación (Ortiz-Jerez et al., 2015) (lo cual explica la diferencia entre la temperatura del agua y las temperaturas del producto).

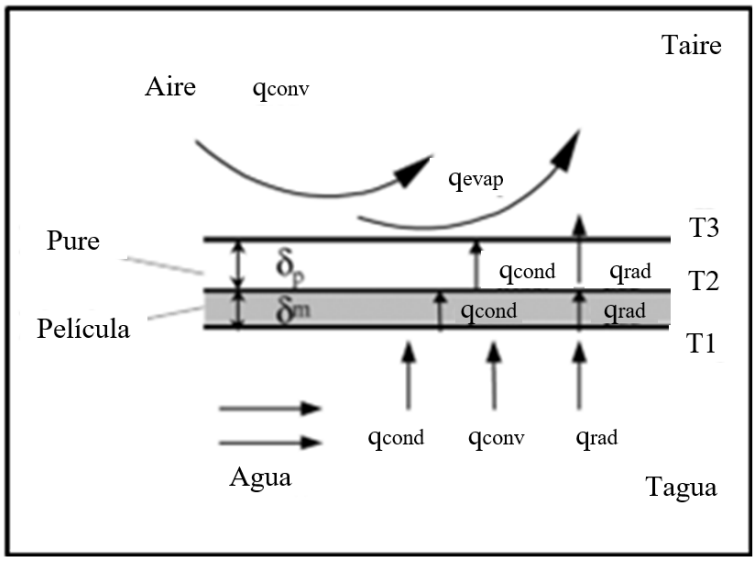


Figura 5 Diagrama ilustrativo de los mecanismos de transferencias de energía involucrados en la ventana refractiva. (Adaptado de Nindo & Tang, 2007)

El requerimiento energético de cualquier unidad de proceso es fundamental desde la perspectiva de la industria. Por lo mismo es necesario evaluar la eficiencia térmica de un sistema de ventana refractiva. En la **Tabla 2**, se muestra una comparativa entre distintas técnicas de secado utilizadas ampliamente en la industria, en termino de capacidad de secado, consumo energético y eficiencia térmica.

Tabla 2 Comparación del consumo energético de la ventana refractiva con otras técnicas de secado. (Adaptado de (Raghavi et al., 2018) y (Nindo & Tang, 2007)).

Tipo de secado	Capacidad típica, kg H2O por m3 o m2	Consumo típico de energía, kJ/kg H2O	Eficiencia térmica, %
Túnel de secado	-	5500-6000	38-42
Secador de bandas	-	4000-6000	38-58
Secador por inyección de vapor	50 m^{-2}	5000-7000	32,9-46
Secador rotatorio	30-80 m^{-2}	4600-9200	25-50
Secador de lecho fluidizado	-	4000-6000	38-58
Secador flash	5-100 m^{-3}	4500-9000	26-51
Secador spray	1-30 m^{-3}	4500-11500	20-51
Tambor de secado	6-20 m^{-2}	3200-6500	35-78
Ventana Refractiva (Escala piloto)	6 m^{-2}	4743	28-48
Ventana Refractiva	1-10 m^{-2}	-	52-77

2.3.2 Túnel de secado

El equipo de túnel de secado es una tecnología de secado de primera generación. El principio de secado que predomina en esta tecnología es la convección, usando como principal medio de transferencia de calor aire caliente o gases de combustión, generando un gradiente de presión de vapor de agua en el contacto gas-solido.

Las principales partes que componen este equipo de secado son un soplador de aire que permite el ingreso de aire a la unidad de proceso a una velocidad constante, un calentador que eleva la temperatura del aire, carros de transporte que movilizan la materia prima húmeda al interior de la unidad de secado y una zona de recepción del producto final. Los túneles de secado presentan diferentes disposiciones, aunque generalmente se utilizan unidades de proceso rectangulares. Operacionalmente, en la entrada del proceso, se disponen una serie de carros de transporte que periódicamente avanzan a lo largo del túnel hasta llegar al final de este. La circulación del aire, el movimiento y los métodos de calentamiento pueden ser diferentes en los distintos túneles. Comúnmente, los arreglos utilizados en los túneles de secado suelen ser flujo contracorriente, flujo paralelo o una combinación de estos. En la **Figura 6** se muestras 3 configuraciones del flujo de aire, siendo esta contracorriente (con respecto a los carros de transporte), co-corriente y con recirculación interna del aire.

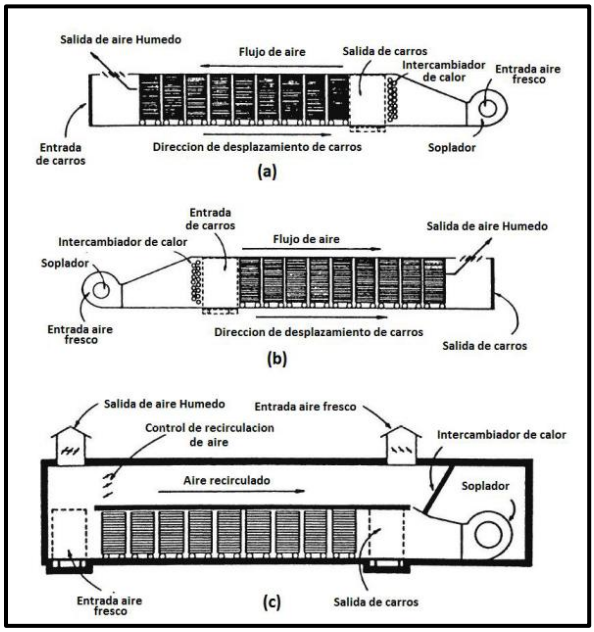


Figura 6 Esquema representativo de secador industrial de túnel de secado, con configuración co-corriente, contracorriente y recirculacion interna del fujo de aire (Adaptado de Mujumdar, 2020).

Dentro de las ventajas que presenta esta tecnología de secado es versatilidad y simpleza en comparación con otros equipos de secado, permite un funcionamiento continuo, puede trabajar con una gran variedad de formato y tamaños de los alimentos, y permite una operación de grandes volúmenes de producción. Como desventaja, presenta una calidad del producto final inferior a

otros métodos de secado, tiempos de secado altos, baja eficiente térmica y limitación en cuanto a secar ciertos formatos de materias primas (por ejemplo, líquidos).

2.3.3 Liofilización

La liofilización es una tecnología de secado de tercera generación, en el cual el agua presente en el alimento es congelada por debajo de la temperatura eutéctica o temperatura de transición vítrea hasta que esté completamente sólido, para ser removida a una presión reducida (por debajo de la presión atmosférica) y una temperatura de operación baja ,a través de la sublimación del agua congelada y de la desorción del agua ligada (agua presente en el alimento que no se puede congelar a baja temperatura). Este proceso permite una remoción de la humedad entre un 95% - 99%. La liofilización presenta una gran importancia en la industria de alimentos y farmacéutico, ya que permite el secado de producto termolábiles (sustancias que son susceptibles a la degradación o descomposición química por la acción de calor).

El proceso de liofilización presenta 3 etapas de proceso: congelación, secado primario y secado secundario.

El proceso de congelación consiste en la solidificación completa de los compuestos constitutivos del alimento, formando solidos cristalinos y no cristalinos. La temperatura de congelación final en el proceso tiene que ser una temperatura más baja que la temperatura eutéctica o temperatura de transición vitreo, para que no exista colapso de la estructura interna del material en etapas posteriores. La velocidad a la que desciende la temperatura en el alimento es otra variable a considerar; en general, en presencia de un proceso de congelación lento, se producen cristales de hielos grandes, los cuales mejoran la transferencia de materia para el secado primario (por la formación de poros más grandes que permiten el paso de agua en la sublimación), pero generan un ruptura de la pared celular y estructuras internas del alimentos, por lo que existe un perdida en la calidad del producto final, especialmente en caso donde se requiere un reconstitución del mismo. Por otro lado, una descenso de la temperatura rápido permite generar unos cristales de hielo pequeños, lo cual mantiene de mejor manera la estructura de alimentos pero esto aumenta el tiempo de operación en el secado primario (dado que se genera una tamaño de poros entre los cristales menor, disminuyendo la transferencia de materia) (Saclier et al., 2010).

Después de la congelación del alimento, el agua presente en él se puede calificar de dos formas. El agua que fue congelada completamente se denomina agua libre; por otra parte, el agua que, a pesar de estar a baja temperatura sigue en estado líquido, se denomina agua ligada.

En la etapa de secado por sublimación, también conocida como secado primario, la presión comienza a disminuir hasta algunos milibares, para después suministrar suficiente energía al alimento para que el agua sublime. Se puede remover, aproximadamente, un 95% del agua presente (Soham, 2011). Esta etapa puede presentar un tiempo de operación prolongada, pero si se suministra una cantidad de energía excesiva, puede alterar las propiedades del producto. La temperatura del alimentos durante la sublimación debe ser menor a la temperatura de transición

vitreo o la temperatura eutéctica, ya que de ser más alta, la estructura del alimentos puede colapsar (Hua et al., 2010).

Después del secado primario, el agua que no fue congelada (agua ligada) es adsorbida por la superficie de la estructura del poro y los grupos polares dentro del material deshidratado. Dado que la energía de adsorción del agua es alta, desorber el agua ligada requiere una temperatura mayor y suficiente suministro de energía, sin que esto altere las propiedades fisicoquímicas del alimento.

El secado por desorción, también denominada secado secundario, consiste en el calentamiento del alimento a una temperatura mayor, con el fin de transformar el agua ligada en agua libre, para que esta absorba el calor suministrado y sea eliminada en forma de vapor. En productos farmacéuticos, el máximo permite generalmente está por debajo de los 40 °C; para el caso de los alimentos tales como frutas y verduras, el máximo permitido se encuentra entre los 60-70 °C o mayor (Hua et al., 2010).

En la **Figura 7** se muestra las etapas del proceso de liofilización de un material, en términos de temperatura y humedad. T_{max1} corresponde a la temperatura eutéctica o de transición vitreo y T_{max2} es la temperatura permisible a la que se puede exponer el material al secado secundario. Así, en la **Figura 8** se muestra un diagrama de la presión con respecto a la temperatura durante el proceso de secado.

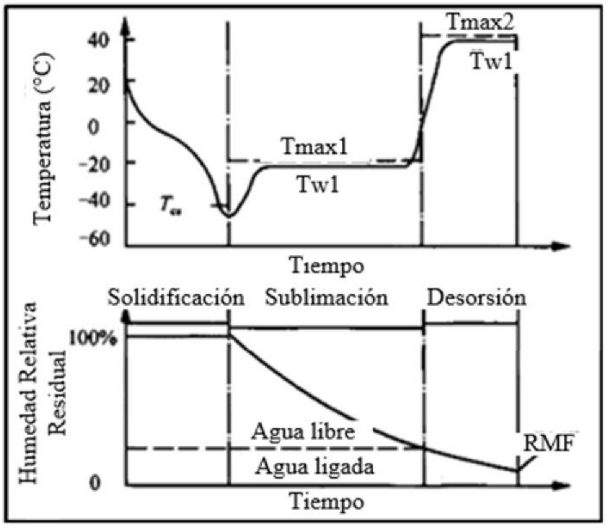


Figura 7 Variación de la temperatura y humedad en un material durante el proceso de liofilización. (Adaptado de Hua et al., 2010)

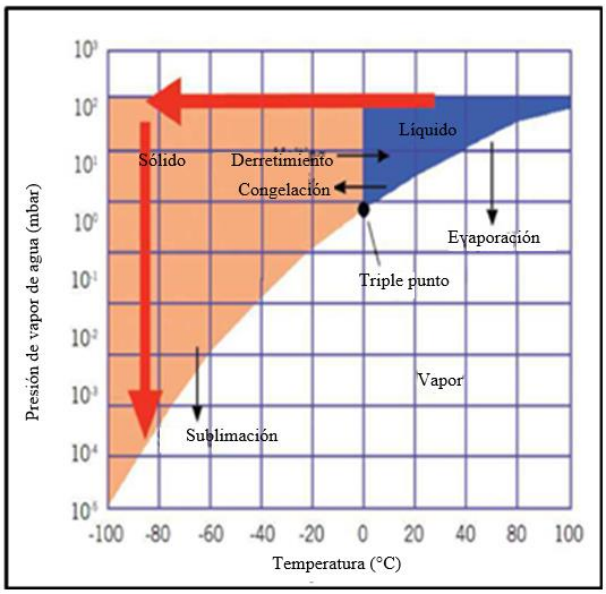


Figura 8 Diagrama de presión vs temperatura durante el proceso de liofilización. (Adaptado de Nireesha et al., 2013)

El proceso de liofilizado es ampliamente conocido como un proceso de secado que permite obtener producto de alta calidad ya que, al operar en temperatura bajas, no produce una degradación de los componentes del alimento por la exposición térmica, por lo que no se produce una reducción nutricional ni un degradación sensorial (Ratti, 2001). En la **Tabla 3**, se exponen las ventajas y desventajas que presenta esta tecnología de secado.

Tabla 3 Ventajas y desventajas del proceso de liofilizado (Soham, 2011).

Ventajas	Desventajas
La descomposición química es minimizada	Compuestos volátiles puede ser removida por un vacío alto
Remueve el agua sin una excesiva exposición térmica	Alto costo capital
Mejor la estabilidad del producto secado	Alto costo operacional
Propiedades sensoriales, como olor y sabor, no se ven alteradas	Materiales de gran volumen presenta tiempo muy prolongados de operación
Permite una reconstitución más rápida y mejor por la presencia de poros microscópicos.	Dificultad de secado en materiales amorfos (que no presente temperatura eutéctica)
	Dificultad en el control del tamaño de los cristales en la etapa de congelación.

2.4 Microperforación con láser CO_2

Los laser (sigla en inglés que significa luz amplificada por la emisión de radiación estimulada) son equipos que generan un haz de luz monocromático, coherente y direccional, que permite hacer pequeñas perforaciones, provocando una destrucción sin contacto mecánico con el material, presentando un mínimo daño en las áreas adyacentes a la aplicación (Fujimaru et al., 2012). Entre las tecnologías del láser, la utilización de gas CO_2 es una alternativa que permite el

tratamiento de diferente material debido a su amplio combinación de potencias de salida y longitud de onda (SYNRAD, 2022). Además, para materiales biológico, el láser de CO_2 es una alternativa interesante, ya que , al operar a una longitud de onda de 10,6 µm, el agua absorbe una gran cantidad de la energía emitida (Ferraz et al., 2007).

Las aplicaciones a gran escala del láser de CO_2 es utilizada en el procesamiento de materiales (específicamente metales), siendo, en muchos casos, superior a los métodos convencionales; dentro de las ventajas que presenta se encuentra una excelente control de la potencia del haz de luz, la ausencia de contacto mecánico con el material y el enfoque específico en la zona de interés, de modo que la energía aplicada está restringida y puede evitar la deformación o descomposición no deseada del material (Witteman, 1987). Sin embargo, existe una gran interés en el desarrollo de esta tecnología para el pretratamiento de alimentos, principalmente para la mejora del coeficiente de transferencia de materia en diferentes procesos, tales como procesos de liofilizado (Fujimaru et al., 2012; Munzenmayer et al., 2020), pelado de alimentos (Ferraz et al., 2007; Silva-Vera et al., 2020), marinaje de carnes (Figueroa et al., 2020; Olivares et al., 2021), empaquetamiento de alimentos (Gaebler & Büchter, 2010) y secado de alimentos (Araya et al., 2022; Veloso et al., 2021), entre otros.

A pesar de que la tecnología de laser CO_2 presenta un interés para la industria de alimentos como pretratamiento de alimentos, hace falta investigación relacionada con los parámetros de calidad de los productos obtenidos al final del proceso, lo cual se muestra como una oportunidad para la investigación de esta área.

2.5 Almacenamiento acelerado

Hoy en día, la industria alimentaria enfrenta diferentes desafíos para el desarrollo de nuevos productos en corto tiempo, los cuales deben presentar una alta calidad, aceptabilidad sensorial y una vida útil prolongada para los consumidores. Por lo mismo, se requieren estudios calidad sensoriales y nutricional durante la vida útil de los productos alimentación, especialmente los de vida útil prolongada. Así, para estimar la vida útil de los productos en donde los consumidores rechazarían el producto, se requiere una demanda de tiempo y presenta dificultades operativas a lo largo del almacenamiento. Dado lo anterior, los ensayos de vida útil acelerada o ensayos de almacenamiento acelerado son una opción atractiva para considerar.

El almacenamiento acelerado se puede definir como un ensayo controlado en el cual se almacenan los productos bajo condiciones ambientales diferentes, lo que permite acelerar el deterioro del producto; este método es de gran ayuda para estudios que se centren en los cambios sensoriales, químico, biológicos y físicos del producto.

El principio de almacenamiento acelerado está basado en el efecto de la temperatura para controlar la velocidad de reacción de los procesos biológicos y reacciones químicas, lo cual está ampliamente investigada en situaciones industriales y domésticas. Generalmente, el incremento de la temperatura acelera estos procesos y permiten evidenciar o detectar un deterioro en el corto

plazo. Sin embargo, la interpretación de la información obtenida de los experimentos y la predicción de los cambios en una almacenamiento en condiciones normales requiere una teoría cinética y modelos matemáticos (Howard R. Moskowitz, I. Sam Saguy, 2009). En la **Tabla 4** se presenta algunas recomendaciones temperatura para realizar ensayo de almacenamiento acelerado para distintos productos.

Además de la temperatura, el deterioro de los alimentos en un almacenamiento acelerado presenta otros factores a considerar. La humedad relativa del almacenamiento como una atmosférica enriquecida o no de oxígeno son condiciones para tener en consideración. En el caso de la humedad relativa, una excesiva humedad relativa puede genera una proliferación en el crecimiento microbiano. Así, un exceso de oxígeno en presencia de una humedad relativa o temperatura alta puede producir oxidación y deterioro que no ocurriría en un almacenamiento normal. (Howard R. Moskowitz, I. Sam Saguy, 2009).

Tabla 4 Recomendación de temperatura para ensayo de almacenamiento acelerado para diferentes productos (Howard R. Moskowitz, I. Sam Saguy, 2009).

Tipos de productos	**Temperatura de almacenamiento (°C)**	**Prueba control (°C)**
Seco, humedad intermedia	30, 35, 40 o 45	40
Enlatado	4, 35, 40	-18
Congelado	-5, -10, -15	<-18
Refrigerado	5, 10, 15, 20	0
Llenado asépticamente	30, 35, 40	0

En los alimentos, la calidad puede ser evaluada mediante la carga microbiana, la perdida de sabores deseables, el desarrollo de sabores indeseables, el deterioro de la textura, los cambio en apariencia, etc. Por lo mismo, una de las tareas del desarrollo de productos alimentarios es identificar cual es el atributo de calidad más adecuado, determinar los métodos de evaluación y establecer un nivel de deterioro en donde el producto se vuelve inaceptable. Los criterios de calidad que comúnmente se determinan en la vida útil de los productos alimenticios son los siguientes:

- Sensorial, tales como sabor, olor, apariencia, textura y detección de malos sabores u olores.
- Química, tales como la perdida de vitaminas, la formación de peróxidos, la acumulación de productos de la reacción de Maillard y el cambio de pH.
- Físico, tales como el cambio de fase o separación, sedimentación, perdida de color, turbidez, formación de productos gelatinosos, endurecimiento indeseable por secado o suavidad por la presencia de humedad.
- Microbiológica, tales como el aumento del conteo total de microorganismo y el crecimiento de una organismo o tipo de organismo especifico.

Howard R. Moskowitz, I. Sam Saguy, 2009 sugieren las siguientes consideraciones para la elección de un o más marcadores de calidad:

- Si no hay un factor limitante en sí mismo, el parámetro de calidad debe ser el más relevante del estado del producto. Este valor puede estar correlacionado con aquellos atributos que determinen su vida útil.
- Si puede ser determinada por un simple ensayo química, física o biológica, es decir, puede ser evaluado sin requerir un proceso de preparación elaborado y/o un largo tiempo.
- Es determinante que no requiera una alta entrenamiento técnico, reactivos costosos, instrumentaría sofisticada y/o un elaborado procesamiento y cálculo de datos.
- Es importante que los datos sean claros, no ambiguos y que requieran mínima interpretación.

Algunos de los problemas que presenta los ensayos de almacenamiento acelerado es la capacidad de alterar las características del producto, debido a la temperatura, lo cual hace que existan distorsiones con respecto a un almacenamiento a condiciones normales (Lawless & Heymann, 2010). Por ejemplo, puede existe un cambio de estado de la materia en el producto, cristalización de carbohidratos, incremento en la actividad de agua en productos deshidratados que causen una velocidad de reacción incrementada y una sobreprediccion de la vida útil real, competencia entre reacción química por la diferencia en el comportamiento de las constantes cinéticas, entre otras.

2.6 Parámetros de calidad alimentaria

2.6.1 Actividad de agua

La actividad de agua (sigla en inglés aw, activity water) es un concepto importante para el entendimiento y control de la vida útil de los alimentos. La actividad de agua se define como la razón entre la presión de vapor ejercida por un alimento y la presión de vapor ejercida por el agua pura a una misma temperatura. Este parámetro es una medición física que representa el agua disponible “activa” que se encuentra en el alimento. Esta actividad es responsable del crecimiento microbiano, las reacciones químicas y la actividad de enzimas. Aunque otros factores tales como la temperatura, el pH y la presión osmótica, entre otros, pueden afectar la preservación de los alimentos, la actividad de agua es uno de los factores que más influye en la vida útil.

En la **Tabla 5** se expone la relación entre el crecimiento de algunos microorganismos con respecto a un rango de actividad de agua para algunos alimentos.

Tabla 5 Rango de actividad de agua y crecimiento microbiano para diferentes alimentos (Dong Chen & Mujumdar, 2008).

Rango de aw	Microorganismo que generalmente se inhiben bajo este rango	Alimentos que generalmente están en este rango
1.00-0.95	Pseudomonas, Escherichia, Proteus, Shigella Klebsiella, Bacillus, Clostridium, Perfringens.	Alimentos frescos altamente perecible y frutas enlatadas, vegetales, carnes, pescados y leches.
0.95-0.91	Salomella, Vibrio parahaemolyicus, C. botulinum, Serratia, Lactobacillus, Pediococcus, Rhodotorula, Pichia.	Algunos quesos, carne curtida, algunos concentrados de jugo.
0.91-0.87	Candida, Trolopsis, Hansenula, Micrococcus.	Salchichas fermentadas (Salami), queque esponjosas, quesos secos, margarina.
0.87-0.80	Mycotoxigenic penicilia, Staphylococus aureus, most Saccharomyces(bailii) spp, Debaryomyces.	Mayoritariamente concentrado de jugos, leche condensada endulzada, sirope de chocolate, maple y rutas; harinas, arroz, con un contendido de 15-17%, queque de fruta.
0.80-0.75	Mayoritariamente bacterias halofilicas, mycotoxigenic aspergilli.	Jamones, mermeladas, mazapán, glaseado de frutas, algunos malvaviscos.
0.75-0.65	Aspergillus chevalieri, A. candidus, Wallemia sebi, Sacchaaromyces bisporus.	Copos de avena con un contenido aproximado de 10% de humedad, melazas, gelatinas, malvavisco, turrones granulados, azúcar de caña, algunas frutas secas, frutos secos.
0.65-0.60	Saccharomyces rouxii, Aspergillus echinulatus, Monascus bisporus.	Frutas deshidratadas con un 15-20% humedad; toffes y caramelos; miel.
0.50	No hay proliferación de microorganismo.	Pasta con un contenido de humedad de un 12%; especies con un contenido de humedad 10%.
0.40	No hay proliferación de microorganismo.	Huevo en polvo con un contenido de humedad de un 5%.
0.30	No hay proliferación de microorganismo.	Cookies, cracker, pan crujiente con un contenido de humedad de un 3-5%.
0.20	No hay proliferación de microorganismo.	Leche en polvo con un contenido de humedad de un 2-3%: vegetales deshidratados con un contenido aproximado de un 5%; queque de frutas; cookies, crackers, etc.

2.6.2 Color

El color se define, desde la percepción en el cerebro, como resultado de la detección de la luz después de que esta haya tenido interacción con los objetos. Los colores percibidos están afectados por tres entidades: la composición física y química de los objetos, la composición del espectro de las fuentes de luz que ilumina el objeto y la sensibilidad del espectro de luz de los ojos de los observadores.

Dada la relevancia de este parámetro en la evaluación sensorial que realizar los consumidores, se han investigado métodos matemáticos que permitan medir la percepción de los colores de manera objetiva y cuantitativa. Dentro de los sistemas matemáticos de color, el más usado son las versiones de CIE. CIE es un acrónimo basado en su nombre en francés "La Commission Internationale de l'Eclairage" o "Comisión Internacional sobre Iluminación". Unos de los sistemas CIE más fáciles para empezar y con menor complejidad es el sistema de tres luces, el cual permite simplificar como percibe los colores un ojo humano a términos de colores específicos (Lawless & Heymann, 2010).

Una de las versiones más recientes y usado de estos espacios de colores es el espacio CIE$L^*a^*b^*$. Este espacio de colores se define como un espacio cartesiano donde existen de coordinada, como se aprecia en **Figura 9**, en donde L^* representa el grado de luminosidad y oscuridad (donde $L^* = 0$ representa el negro absoluto y $L^* = 100$ el blanco absoluto), el espacio cromático está constituido por las coordinadas a^*y b^*, donde $+a^*$ indica el color rojo, $-a^*$indica el color verde, $+b^*$ indica el color amarillo y $-b^*$ indica el color azul.

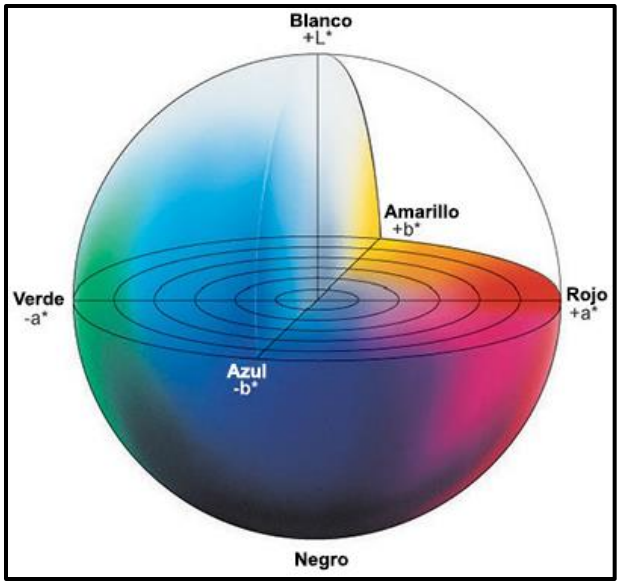


Figura 9 Espacio cartesiano de color de sistema CIE$L^*a^*b^*$ (Konica Minolta, 2022).

En la **Tabla 6** se muestra un criterio para identificar la significación de la diferencia de color presente en la muestra analizada.

Tabla 6 Criterio de evaluación sensorial de diferencias de color (Dong Chen & Mujumdar, 2008).

Diferencia de color	ΔE^*
Imperceptible	0-0,5
Ligero	0,5-1,5
Perceptible	1,5-3,0
Apreciable	3,0-6,0
Grande	6,0-12,0
Muy obvio	>12,0

2.6.3 Textura

El conocimiento de las propiedades de la textura es importante para las partes interesadas en la cadena de valor de los alimentos, incluyendo los productores, manipuladores de la postcosecha, procesadores, comerciales y consumidores. Para alimentos frescos, las propiedades de textura como la firmeza son ampliamente usada como un indicador para la preparación de la cosecha, para los requerimientos en términos de manipulación, almacenamiento y aceptabilidad por parte de los consumidores. En alimentos procesados, entender las propiedades de la textura es importante para el control de operaciones unitarias tales como el calentamiento, refrigeración y secado, para lograr así los atributos de calidad deseados para el producto final (Chen & Opara, 2013).

La textura de los alimentos puede ser evaluado mediante análisis descriptivos sensoriales (subjetivo) o instrumentales (objetivo). La combinación de tiempo y altos costo asociado a los análisis sensoriales han motivado al desarrollo y la ampliación del uso de pruebas mecánicas empíricas que permitan hacer una correlación con el análisis sensorial de la textura del alimento.

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

Dentro de las mediciones de textura, existe diferentes métodos empíricos que permite medir algunos aspectos de la textura del alimento, de acuerdo con el sector industrial que pertenece y al tipo de producto. A continuación, se exponen los diferentes métodos mecánicos para medir la textura:

- Ensayo de punción: Mide la fuerza necesaria para empujar una sonda a través de un alimento a una profundidad especifica o la distancia de penetración lograda mediante la aplicación de una fuerza especifica
- Ensayo de compresión: Mide la fuerza necesaria para logra una compresión determinada o la compresión a una fuerza dada. En las pruebas de extrusión, el alimento se fuerza a través de uno o más orificio y se mide la fuerza máxima, la fuerza promedio o el trabajo realizado durante un tiempo determinado. Los valores

medidos se relacionan con la firmeza, la tenacidad, la consistencia o la capacidad de untar.

- Ensayo de corte: En este ensayo se utiliza cables o cuchillas para cortar a través de un alimento y medir el esfuerzo máximo desarrolla o el tiempo necesario para cortar a través de un tamaño estándar. Las mediciones asumen una relación entre la fibrosidad, firmeza o dureza.

2.6.4 Capacidad antioxidante y contenido total de polifenoles

La oxidación es la transferencia de electrones desde un átomo a otro, el cual representa una parte esencial de la vida aerobia y nuestro metabolismo, siendo el oxígeno nuestro último aceptor en el sistema de transferencia de electrones para producir energía a través en forma de ATP. Los problemas que pueden surgir este proceso es que el flujo de electrones venga desacoplado (transferencia de un electro desapareado), lo cual puede terminar formando radicales libre. Los radicales libres son especies química que poseen uno o más electrones desapareados; estas especies son altamente reactivos y atacan rápidamente las moléculas que conforman nuestro celular, causando un daño que es inevitable y que requiere ser reparado. Estos son capaces de dañar biomoléculas cruciales estales como ácidos nucleidos, lípidos, proteínas, ácidos grasos polisaturados y carbohidratos; además pueden dañar el ADN, provocando mutaciones. Si los radicales libre no son captados por los constituyentes de las células, estos pueden estimular una reacción en cadena donde se dañar sucesivamente las biomoléculas anteriormente mencionadas.

Un antioxidante es aquella molécula que es capaz de inhibir la oxidación de otras moléculas. En termino de alimentos, un antioxidante puede ser definido como cualquier sustancia que presente en bajas cantidades, posea una capacidad de retardar o inhibir la oxidación de un sustrato significativamente. Los compuestos antioxidantes pueden atrapar los radicales libres e incrementar la vida útil de los productos, dado que retarda el proceso de peroxidación lipídica, la cual es una de las mayores causas de deterioró de los productos alimentarios y farmacéuticos durante el proceso de elaboración y almacenamiento (Halliwell, 1996). Además, los antioxidantes pueden proteger el cuerpo humano de los radicales libres.

La mayor fuente de compuestos bioactivos presentes en la naturales son los compuestos fenólicos y los flavonoides, las cuales son responsables del barrido y atrapamientos de radicales libres, debido a la estructura que presentan. Los principales representantes de los compuestos antioxidantes presentes en la dieta son la vitamina C, los tocofenoles, carotenoides y los flavonoides. Los antioxidantes naturales pueden encontrarse en todas las plantas, microrganismo, hongos y en algunos tejidos animales. Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios las plantas.

Los flavonoides son las componentes comunes en las plantas. Mas de 8000 polifenoles incluido más de 4000 flavonoides han sido identificado en varias especies de plantas, y este número sigue creciendo (Harborne et al., 1999). Los flavonoides son formados en las plantas por un aminoacido aromático fenilamina, tirosina y malonato. La mayoría de los flavonoides en las

plantas se presentan como glucósidos. Algunos de los flavonoides más comunes son la apigenina, crisina, luteolina, datiscetina, quercetina, miricetina, morina, kaempferol. (Macheix et al., 2018).

Los ácidos fenólicos son derivados hidroxilo de ácidos carboxílicos aromáticos, que surgen del grupo del ácido benzoico o del grupo del ácido cinámico. Los ácidos fenólicos, tales como el ácido p-hidroxibenzoico, el ácido 3,4-dihidroxibenzoico, el ácido vanílico, el ácido siringico, el ácido p-cumárico, el ácido cafeico, el ácido ferúlico, el ácido sinápico, acido clorogénico, y el ácido rosmarinico, están presentes principalmente en el reino vegetal. La capacidad antioxidante de los ácidos fenólicos y sus derivados depende del número y la posición de los grupos hidroxilo unidos al anillo aromático, además de la unión que presenten y la posición mutua entre los grupos hidroxilo.

Dado la importación que ha adquirido en las últimas décadas el estudio de los compuestos antioxidantes, se ha requerido el desarrollo de pruebas para el análisis de la capacidad antioxidante de una serie de alimentos. Un método estandarizado para medir los componentes con capacidad antioxidante de un alimento tiene que seguir, idealmente, los siguientes requerimientos (Prior et al., 2005) :

- Medir la química que ocurra realmente en las aplicaciones potenciales.
- Utilizar una fuente de radical biológicamente relevante.
- Ser sencillo.
- Utilizar un método con una finalidad y mecanismo químicos definidos.
- Los insumos químicos e instrumentación deben ser de fácil disponibilidad.
- Buena reproducción dentro del ciclo.
- Adaptable para ensayos de antioxidantes hidrófilos y lipófilos, y en el uso de diferentes fuentes de radicales.
- Adaptable para análisis de alto rendimiento para análisis de control de calidad de rutina.

Los métodos existentes pueden clasificarse de acuerdo de los mecanismos de reacción; esto puede ser HAT (sigla en inglés que significa transferencia de átomo de hidrogeno) y SET (transferencia de un electrón solitario). Si bien los dos métodos presentan rutas de reacción y cinéticas diferentes, los datos obtenidos representan los mismos resultados.

Los métodos basados en HAT miden la capacidad que tiene un antioxidante para aplacar los radicales libres mediante la donación de hidrogeno. A continuación, se mencionan los métodos que se basan en el mecanismo de reacción HAT (Huang et al., 2005):

- Capacidad de absorción de radicales de oxígeno (ORAC).
- Parámetro antioxidante total para atrapamiento de radicales (TRAP).
- Inhibición de la oxidación de LDL inducida
- Ensayo de capacidad total de captación de oxiradicales (TOSCA)
- Ensayos de blanqueo de crocina

- Ensayo quimioluminiscente.

Los métodos basados en SET miden la capacidad de un antioxidante potencial. La reactividad en los métodos de SET se basa principalmente en la deprotonación y el potencial de ionización del grupo funcional reactivo. Los ensayos basados en SET son los siguientes (Prior et al., 2005):

- Ensayo de polifenoles totales por reactivo de Folin-Ciocalteu.
- Ensayo de capacidad antioxidante de equivalente de Trolox (TEAC).
- Ensayo de poder antioxidante reducto de iones férricos (FRAP).
- Ensayo de potencial antioxidante total, utilizando complejos de Cu^{2+} como oxidante.
- Ensayo de eliminación de radicales 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH).
- Ensayo de eliminación de radicales de ácido 2,2-azinobis 3-etilbenzotiazolina-6-sulfonico (ABTS).
- Ensayo de eliminación de radicales N,N-dimetil-p-fenilendiamina (DMPD).
- Ensayo del poder antioxidante reductor de iones cúpricos (Cu^{2+}) (CUPRAC).

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Materia prima

La materia prima utilizada fueron manzanas de la variante *Granny Smith*, expuestas en la **Figura 10**, las cuales se obtuvieron de un comercio local de la ciudad de Valparaíso. Estas manzanas fueron trasladadas al Laboratorio de Alimentos y Bioprocesos del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, en Universidad Técnica Federico Santa María, y se almacenaron a una temperatura de 2 °C hasta su utilización.

Para la preparación de las manzanas, estas fueron cortadas en rodajas de 4 mm de espesor a través de una mandolina, para así realizarle un corte circular con un sacabocados, dejando un diámetro de la circunferencia de 40 mm, como se muestra en la **Figura 11**.

Figura 10 Manzanas *Granny Smith*.

Figura 11 Rodaja de manzana.

Una vez obtenida la forma de las muestras, se sumergieron en una solución anti-pardeo durante 1 minuto, con la finalidad de evitar la oxidación de las muestras. La solución fue preparada con agua destilada, a un 2% p/p de ácido ascórbico y 1% p/p de ácido cítrico.

3.2 Equipos

3.2.1 Laser CO_2

Las microperforaciones se realizaron con un láser de CO_2. El modelo es SYNRAD TI100, el cual se muestra en la **Figura 12**.

Figura 12 Equipo de laser CO2 modelo SYNRAD TI100.

Para la densidad de poros se define una configuración de panal, como la que se muestra en la **Figura 13**. Para el cálculo de las distancias entre los poros en un hexágono regular, se utiliza la densidad determinada en el diseño experimental (9, 16 y 25 poros/cm^2) y el centro del poro como referencia para formar el panal, por lo que cada área presenta 3 poros completos.

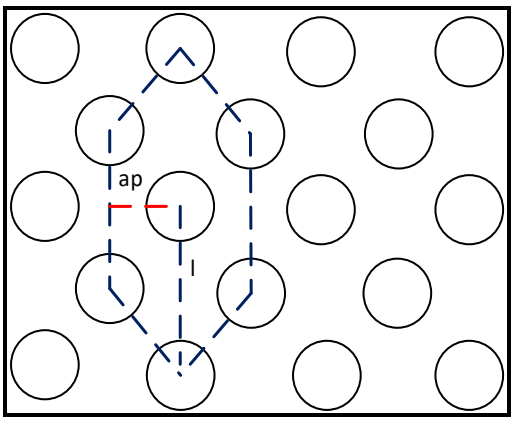


Figura 13 Diagrama de distribución de poros en forma de panal a lo largo de la rodaja.

A través de la **Ecuación (1)** y **(2)**, se muestran las fórmulas para despejar los valores l y ap. Como resultado, se obtiene las distancias entre los poros que se muestran en la **Tabla 7.** En la **Figura 14** se puede observar una de las rodajas perforadas.

$$\text{Area}\left(\frac{\text{poros}}{\text{cm}^2}\right) = \frac{6 \cdot \text{l} \cdot \text{ap}}{2} \tag{1}$$

$$\text{ap} = \sqrt{\text{l}^2 - \left(\frac{\text{l}}{2}\right)^2} \tag{2}$$

Tabla 7 Distancia entre poros en configuración panal.

Densidad de poro (poros/cm2)	**l (mm)**	**ap (mm)**
9	3.58	3.1
16	2.69	2.33
25	2.15	1.86

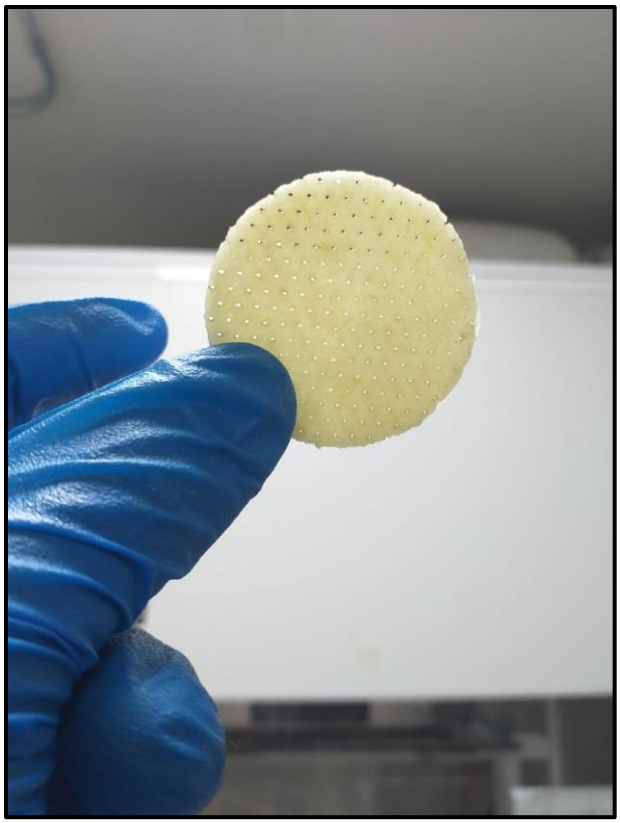


Figura 14 Muestra de rodaja de manzana perforada.

Para la validación de los tamaños de poros, se utilizó un microscopio invertido marca A.KRUSS Optronic GmbH, modelo MBL3200, el cual se muestra en la **Figura 15**. A través de este, se obtiene los diámetros de poro de 203.25 ± 23.05, 417.89 ± 6.14 y 623.41 ± 7.50 µm, respectivo al diámetro teórico que corresponde, los cuales se pueden visualizar en las **Figura 16**, **Figura 17** y **Figura 18**.

Figura 15 Microscopio invertido A.KRUSS Optronic GmbH, modelo MBL3200.

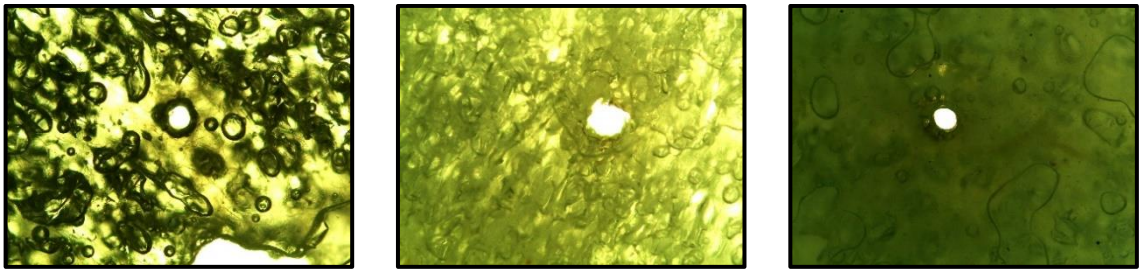


Figura 16 Imágenes a través de microscopio invertido para validación de diámetro de poro de 200 µm.

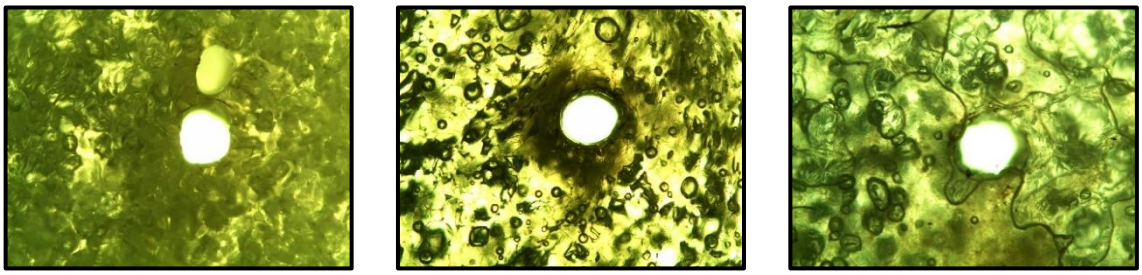


Figura 17 Imágenes a través de microscopio invertido para validación de diámetro de poro de 400 µm.

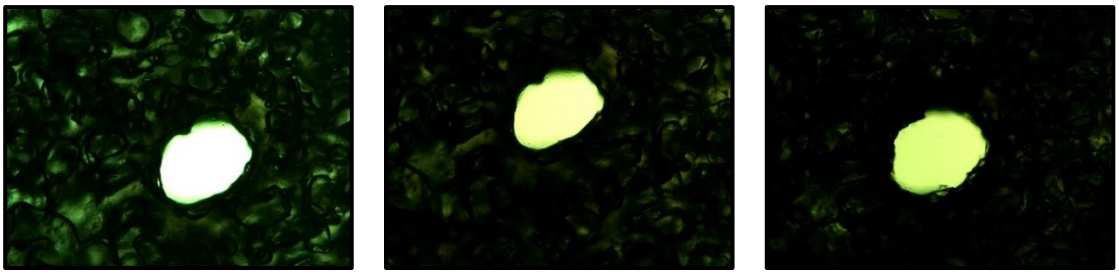


Figura 18 Imágenes a través de microscopio invertido para validación de diámetro de poro de 600 µm.

3.2.2 Deshidratación por ventana refractiva

La ventana refractiva está compuesta por un baño termorregulado de agua, marca Mermmet, modelo WNB, en el que se dispone una lámina de Mylar de dimensiones 30 cm de ancho por 50 cm de largo sobre el agua. El baño presente una precisión de ± 0.1 °C para el control de temperatura. Se deben tener en cuenta, en la operación de la ventana refractiva, la formación de burbujas en la interfase Mylar-agua, ya que disminuye el coeficiente de transferencia de calor, por la falta de contacto entre la película y el agua. Además, se debe mantener un nivel adecuado de agua en el baño. En la **Figura 19**, muestra el equipo de secado de ventana refractiva utilizada. La humedad relativa fue medida a través del instrumento termohigrómetro marca ISOLAB modelo 060.030.001, con una precisión de ± 1%. La humedad relativa en el laboratorio fue 47 ± 8%.

Figura 19 Ventana refractiva marca Mermmet, modelo WNB.

3.2.3 Deshidratación por secado convencional

El equipo de secado convencional utilizado fue el túnel, el cual es un túnel rectangular de acero de 270 m de largo y 40 cm de ancho, como se muestra en la **Figura 20**. Por uno de los lados se encuentra un ventilador que impulsa el aire a una velocidad promedio de 1.53 ± 0.25 m/s, el cual medido por un anemómetro marca DIGI-SENSE, modelo 20250-23. El aire pasa a través de una resistencia acoplada dentro del túnel, que permite calentarlo a una temperatura de 70 °C.

A un costado del túnel se encuentra una ventanilla de vidrio en donde se disponen una termocupla para la medición y control de la temperatura, y tres secciones para colocar bandejas rectangulares de 30 cm por 50 cm, donde se dispusieron las rodajas de manzanas. Por cada bandeja se colocaron 16 rodajas en dos filas.

Figura 20 Túnel de secado.

3.2.4 Deshidratación por Liofilizador

El proceso de liofilización fue realizado en el equipo Alpha 2-4 LSCplus, mostrado en la **Figura 21**. Las rodajas de manzana fueron previamente congeladas a -80 °C por 22 horas en una supercongeladora marca HAIER, modelo DW-86W100J, para posteriormente se introducidas en el liofilizador a unas condiciones de operación de 0.3 mbar y -30 °C durante 24 horas.

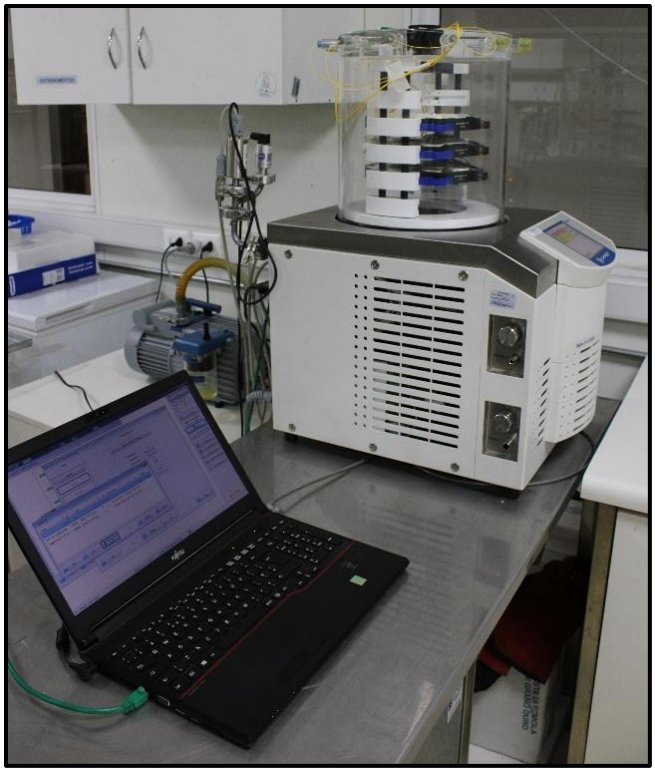


Figura 21 Liofilizador Alpha 2-4 LSCplus.

3.2.5 Ensayo de almacenamiento acelerado

Para la realización de los ensayos de almacenamiento acelerado, se dispone de una estufa con control de humedad relativa marca Memmert, modelo HCP-108, la que se muestra en la **Figura 22**. Con ella se colocaron las muestras para los diferente análisis y semanas en bolsas tipo ziplot de aluminio.

Las condiciones a las que opera la estufa fueron 45 °C y una humedad relativa de 75%, a lo largo de 4 semanas.

Figura 22 Estufa con control de humedad marca Memmert, modelo HCP-108.

3.3 ANALISIS DE PROPIEDADES

3.3.1 Determinación de humedad

Para determinar el contenido de humedad que presentan las muestras de manzana, se utilizó el método estipulado en Association of Official Analytical Chemists (AOAC), metodología 934.06. En este método, se introduce entre 5 a 10 g de muestra en un desecador, en el cual se utiliza una bomba de vacío para alcanzar una presión de 0.3 bar.

Posteriormente, el desecador es colocado en una estufa marca Memmert, modelo 100-800, la cual opera a una temperatura de 60 °C por un tiempo de 24 horas o hasta que el peso de las muestras es constante.

La **Ecuación (3)** permite medir la humedad presente en las muestras.

$$\mathrm{H} = \frac{\mathrm{M}_i + \mathrm{M}_p - \mathrm{M}_f}{\mathrm{M}_i} \cdot 100\% \tag{3}$$

Donde H es la humedad de la muestra, $\mathrm{M_i}$ es la masa inicial de la muestra, M_p es la masa de la placa y $\mathrm{M_f}$ es la masa final entre la muestra seca y la masa de la placa después del uso de la estufa.

3.3.2 Determinación de actividad de agua

Para la medición de la actividad de agua de las muestras se utilizó un higrómetro de punto de roció marca AquaLab, modelo Serie 4TE, el cual se muestra en la **Figura 23**. Este equipo presenta un rango de medición desde 0.05 a 1.000, con una precisión de ± 0.003.

Figura 23 Higrómetro marca AquaLab, modelo Serie 4TE.

3.3.3 Determinación de color

Para la determinación del color y su diferencia con respecto a una referencia, se utilizó las coordenadas del espacio de color a través del método Cie*L*a*b**. El instrumento de medición fue un colorímetro marca Konica Minolta, modelo CR-400, el cual se muestra en la **Figura 24**.

Figura 24 Colorímetro marca Konica Minolta, modelo CR-400.

Antes del uso del instrumento, se calibra a través de un color patrón blanco, para su correcta medición.

Para calcular la diferencia de color presente en una muestra se utiliza la **Ecuación (4)** donde L_0^*, a_0^* y b_0^* representan los parámetros de color de una referencia dada.

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_1^* - L_0^*)^2 + (a_1^* - a_0^*)^2 + (b_1^* - b_0^*)^2} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (4)$$

Para la evaluación de la diferencia de color entre determinadas muestra y una muestra de referencia, se utilizará como referencia del color las muestras liofilizadas, dado que son las muestras con mejor retención de parámetros de calidad y pertenecen a la misma categoría del resto de los productos (productos deshidratados).

3.3.4 Determinación de textura

En la evaluación de la dureza de las muestras obtenidas, se utilizó en el texturómetro Brookfield, modelo CT3, mostrado en la **Figura 25**. Para medir la dureza de las muestras, se midió el esfuerzo máximo obtenido en las condiciones definidas en la **Tabla 8**. El software usado para controlar el texturómetro, visualizar y registrar los datos obtenidos fue el programa software TexturePro CT.

Tabla 8 Condiciones de medición y operación del ensayo de textura.

PARAMETROS	DESCRIPCION
Numero de rodajas	6
Test	Compresión
Carga	0.1 N
Velocidad Test	1 mm/s
Valor Meta	50% del espesor total
Accesorio	TA25/1000
Base	TA-BT-5

Figura 25 Texturómetro marca Brookfield, modelo CT3.

3.3.5 Determinación de solidos solubles totales

El instrumento para medir los sólidos solubles totales en los diferentes productos obtenido fue el refractómetro digital marca Hanna Instruments, modelo HI-96811, el cual se expone en la **Figura 26**. Este instrumento posee un rango de medición de 0 a 50 °Brix, con un valor de resolución ± 0.1 °Brix.

Figura 26 Refractómetro digital marca Hanna Instruments, modelo HI-96811.

Para la determinación de los sólidos solubles en las muestras, se tomaron 2 g de muestra, las que fueron molidos a través de un mortero y colocados en un frasco. Se le adicionaron 25 mL de agua destilada y se mezclaron para homogeneizar la solución. Finalmente, la solución fue

filtrada para separar la parte solida de la liquida y se colocaron unas gotas de la solución liquida filtrada en el lente del refractómetro.

Para calcula el porcentaje de los sólidos solubles totales en las muestras, se utiliza la **Ecuación (5).**

$$X^{ss} = \frac{(W + M \cdot H) \cdot A}{M \cdot (100\% - A)} \tag{5}$$

Donde X^{ss} es el porcentaje de solidos solubles en base humedad, W es la masa de agua que se adiciona, M es la masa de muestra, H es la humedad de la muestra y A es el porcentaje de grados brix proporcionado por la lectura del refractómetro.

3.3.6 Determinación del contenido de polifenoles totales

Para la medición de contenido de polifenoles totales, se utilizó una método de análisis por espectrofotometría mediante un ensayo con reactivo de Folin-Ciocateau (Galaz et al., 2017).

El espectrofotómetro utilizado fue un espectrofotómetro marca SPECTRONIC, modelo UV/Vis Genesys 5 Optimizen Pro, el cual se muestra en la **Figura 27**. Este instrumento posee un rango de longitud de onda de 190 – 1100 ± 0.1 nm, y una fotometría de -3.0 a 3.0 ABS con una precisión de ± 0.003 ABS. La fuente de luz que posee es de Tungsteno-Halógeno y Deuterio. En el espectrofotómetro, las muestras se disponen en celdas de plástica, las que son atravesadas por un haz de luz de longitud de onda de 765 nm.

Figura 27 Espectrofotómetro UV/Vis Genesys 5, modelo Optimizen Pro.

En la metodología utilizada, se prepara un extracto metanólico de las muestras, el cual consiste en una solución con una relación 1:10 entre las muestras de la manzanas y metanol al 80%. Para ello, se agregan 2 g de muestra en 20 mL de metanol al 80%, se homogenizan y se deja extraer durante 1 hora. Luego, se toma una alícuota del extracto y se diluye en relación 1:10

Posteriormente, se toma una alícuota de 0.5 mL del extracto de manzana diluido y se agrega 3.75 mL de agua destilada y 0.25 mL del reactivo Folin-Ciocateau. A la solución anterior, se le agrega 0.5 mL de una solución de 10% de Carbonato de Sodio (Na_2CO_3). Cada tubo de ensayo fue agitado durante 30 segundos y se dejó reaccionar durante 30 minutos a temperatura ambiente, en ausencia de luz. Finalmente, se realiza la lectura en el espectrofotómetro, obteniendo una absorbancia, la que se representa en concentración de unidades de ácido gálico equivalente (GAE). La curva de calibración se expone en la **Figura 28**.

En la **Ecuación (6)** se muestra la forma de obtener los resultados del contenido de polifenoles totales de las muestras analizadas.

$$\mathrm{PFT}\left(\frac{\mathrm{mgGAE}}{\mathrm{g_{bh}}}\right) = \mathrm{f(ABS)}\left(\frac{\mathrm{mg\ GAE}}{\mathrm{L}}\right) \cdot \frac{1(\mathrm{L})}{1000\mathrm{mL}} \cdot \left(\frac{10}{1}\right) \cdot \frac{\mathrm{VmL}}{\mathrm{Mg}} \tag{6}$$

Donde $\mathrm{f(ABS)}$ es la concentración de polifenoles totales en GAE obtenido a través de la curva de calibración, M es la masa de la muestra utilizada en el extracto metanólico y V es el volumen de metanol agregado en el extracto metanolico.

Para realizar la curva de calibración, se utilizó una solución patrón de ácido gálico a una concentración de 1 g/L. Esta fue diluida a diferentes concentraciones en un rango de 0 a 120 mg/L en intervalos de 20 mg/L. Para cada concentración, se obtiene la absorbancia y se gráfica, obteniendo la curva de calibración y su ecuación, en ácido gálico equivalente (GAE).

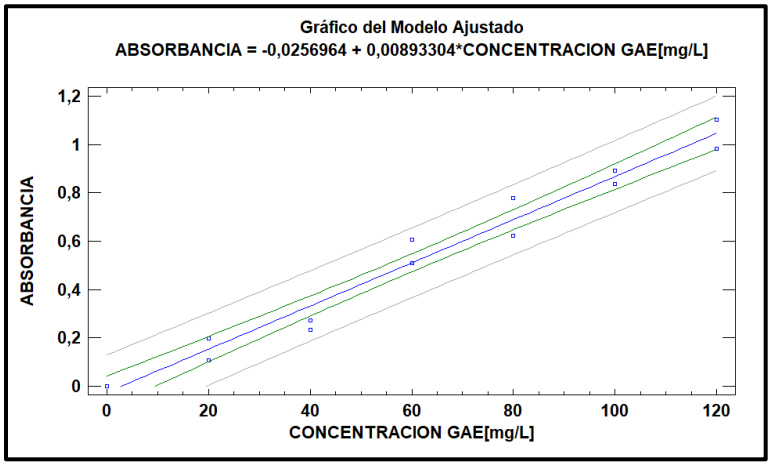


Figura 28 Curva de calibración para análisis de polifenoles totales.

3.3.7 Capacidad antioxidante

Análogamente al análisis del contenido de polifenoles totales, la capacidad antioxidante se determinó a través de un ensayo de espectrómetro, utilizando el mismo instrumento de la **Figura 27**. Este ensayo se realizó a través del método de 2,2-difenil-2-picril-hidrazilo (DPPH) (Galaz et al., 2017), a una longitud de onda de 517 nm.

Al igual que el ensayo anterior, se preparan un extracto metanólico de las muestras, el cual consiste generar una relación 1:10 entre las muestras de la manzanas y metanol al 80%. Para ello, se agregan 2 g de muestra en 20 mL de metanol al 80%, se homogeniza y se deja extraer durante 1 hora. Luego se toma una alícuota del extracto y se diluye en relación 1:100. Finalmente, se añade una alícuota de 0.5 mL del extracto de manzana diluido y se añade 2.5 mL de DPPH a una concentración de 0.1 mM en metanol puro. Cada tubo de ensayo fue agitado durante 30 segundos y se dejó reaccionar durante 30 minutos a temperatura ambiente, en ausencia de luz. Finalmente, se utiliza el espectrofotómetro para obtener la absorbancia, la cual permite obtener la concentración en equivalente del ácido 6-hidroxi-2,5,7,8-tetrametilcroman-2-carboxílico, Trolox equivalente (TE). La curva de calibración se muestra en la **Figura 29**.

La **Ecuación (7)** muestra la relación entre la absorbancia obtenida del espectrofotómetro y la concentración TE obtenida.

$$\mathrm{DPPH}\left(\frac{\mu\mathrm{mol\ TE}}{\mathrm{g_{bh}}}\right) = \mathrm{g(ABS)}\left(\frac{\mu\mathrm{mol\ TE}}{\mathrm{L}}\right)\cdot\frac{1(\mathrm{L})}{1000\mathrm{mL}}\cdot\left(\frac{100}{1}\right)\cdot\frac{\mathrm{VmL}}{\mathrm{Mg}} \tag{7}$$

Donde $\mathrm{g(ABS)}$ es la concentración de TE obtenido a través de la curva de calibración, M es la masa de la muestra utilizada en el extracto metanolico y V es el volumen de metanol agregado en el extracto metanolico.

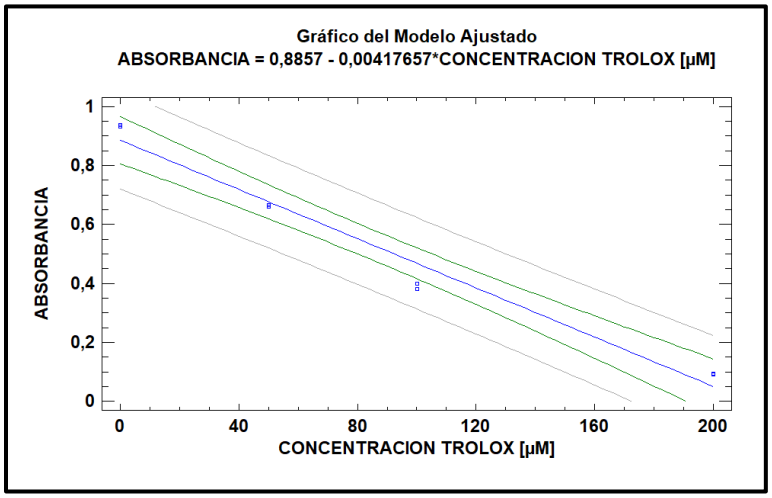


Figura 29 Curva de calibración para análisis de capacidad antioxidante.

Para realizar la curva de calibración, se utilizó una solución patrón de Trolox, a una concentración de 1 mm. Esta fue diluida a diferentes concentraciones en intervalos de 0, 50, 100 y 200 µm Para cada concentración, se determinó la absorbancia de las muestras y se grafica los puntos dado, los cuales se obtiene la concentración en TE.

3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

En la presente investigación, se realizó un diseño experimental de 3 variables con 3 niveles. Las variables fueron la temperatura de operación de la ventana refractiva, el diámetro de poro y la densidad de poro en la rodaja. En la **Tabla 9** se muestran los valores de cada variable con su respectivo nivel en el diseño experimental propuesto. Así, se utilizan como controles sin microperforaciones los secados por ventana refractiva a 70, 80 y 95 °C, túnel a 70 °C y liofilizador.

Tabla 9 Variables y niveles del diseño experimental.

FACTORES/NIVELES	UNIDADES	1	2	3
$\mathbf{T_i}$	°C	70	80	95
$\boldsymbol{d_{pi}}$	µm	200	400	600
$\mathbf{D_{pi}}$	poros /cm^2	9	16	25

Donde T_i, d_{pi} y D_{pi} corresponden a las variables de temperatura, diámetro de poro y densidad de poros, respectivamente, para el nivel i correspondiente.

Dada la cantidad de experimentos, se propone utilizar el modelo de diseño de experimental de Box-Benhken, el cual permite evitar puntos extremos en las configuraciones de los experimentos, evitando experimentos infructuosos, reduciendo el número de los experimentos totales, el tiempo empleado y los costos de la investigación. En la **Tabla 10** se muestra el diseño experimental con el que se trabajó a lo largo de la investigación. Se presentan 15 experimentos para realizar en el laboratorio.

Tabla 10 Diseño experimental a través del modelo de Box-Benhken.

Experimentos	Temperatura	Tamaño de poro	Densidad de poros
1	1	1	2
2	1	3	2
3	3	3	2
4	3	1	2
5	1	2	1
6	1	2	3
7	3	2	3
8	3	2	1
9	2	1	1
10	2	1	3
11	2	3	3
12	2	3	1
13	2	2	2
14	2	2	2
15	2	2	2

Para cada experimento (exceptuando el liofilizado), se realizó una curva de actividad de agua, la cual consiste en medir la actividad de agua de las muestras a un intervalo de tiempo dado. Como ello, se puede definir el tiempo en el cual el secado se detiene, la que se considera cuando la actividad de agua presenta un valor menor a 0.4.

Definidos los tiempos de secado de cada experimento, se procedió a realizar los análisis de humedad, solidos solubles totales, color, textura, capacidad antioxidante, contenido de polifenoles totales.

Para los experimentos de almacenamiento acelerado, se realizaron análisis de las propiedades de las muestras para observar los cambios producidos. Se eligieron tres muestras con microperforaciones con las mejores características en términos de color, capacidad antioxidantes y contenido de polifenoles totales.

3.5 ANALISIS ESTADISTICO

La prueba de significancia de los resultados se realizó con un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de rango múltiples de Duncan con una significancia del 95% usando el software STATGRAPHIC Centurion XVI.

Los análisis de humedad, actividad de agua, color, solidos solubles totales, capacidad antioxidante y contenido de polifenoles totales se realizaron en triplicado. Los ensayos de textura se realizaron en duplicado.

4. RESULTADOS

4.1 MUESTRAS CON MICROPERFORACION LASER Y EXPERIMENTOS CONTROLES

4.1.1 Curva de actividad de agua

En la **Figura 30**, **Figura 31** y **Figura 32** se exponen las curvas de actividad de agua en ventana refractiva a las temperaturas de 70, 80 y 95 °C. En la **Figura 33** se muestra la curva de actividad de agua en el túnel de secado a 70 °C.

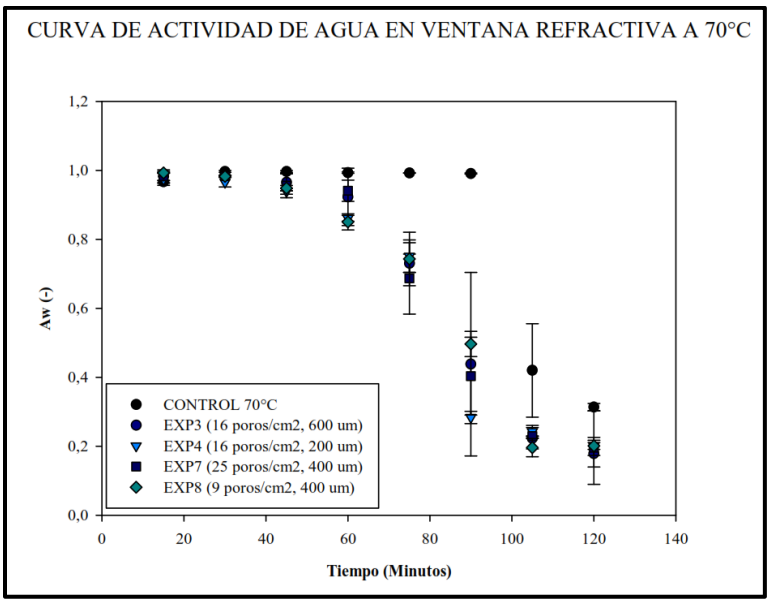


Figura 30 Curva de actividad de agua en ventana refractivo a 70°C en muestra con microperforaciones y experimento control.

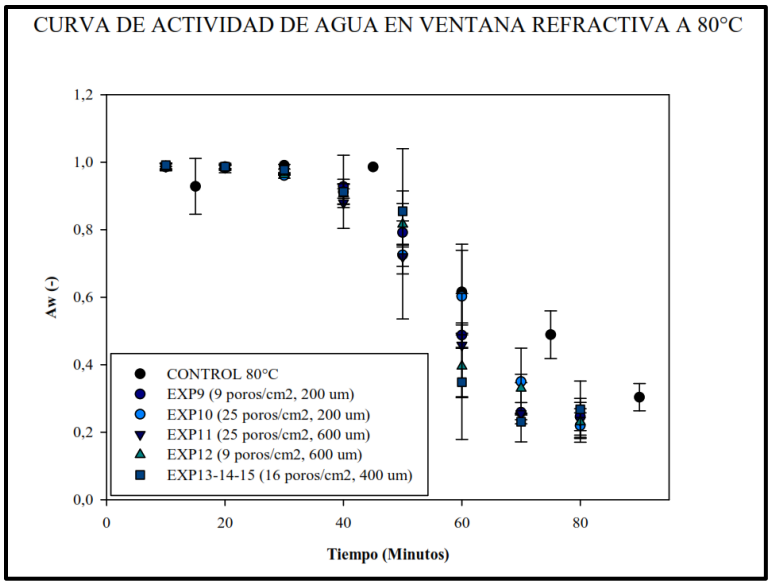


Figura 31 Curva de actividad de agua en ventana refractivo a 80°C en muestra con microperforaciones y experimento control.

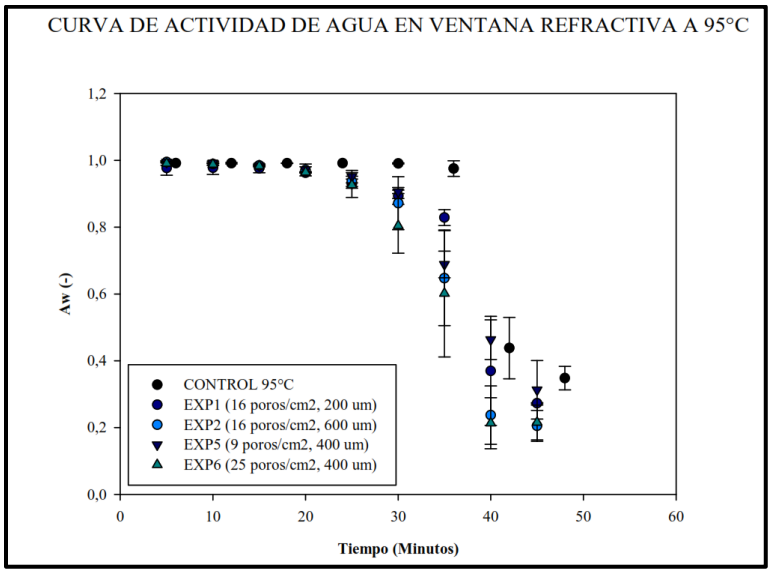


Figura 32 Curva de actividad de agua en ventana refractivo a 95°C en muestra con microperforaciones y experimento control.

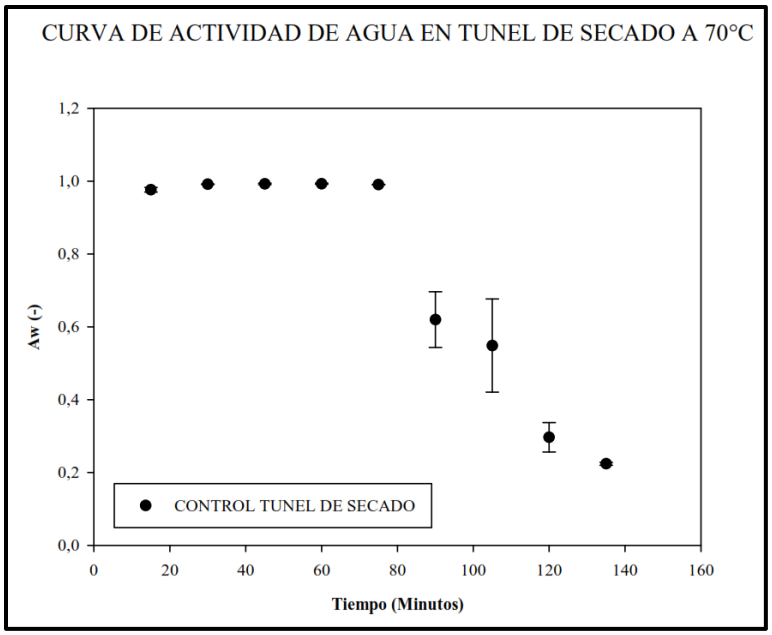


Figura 33 Curva de actividad de agua en túnel de secado a 70°C.

En la **Figura 34** se exponen los tiempos de secado la que las muestras presentan una actividad de agua menor a 0.4. En la **Tabla 11** se muestras los tiempos de secado obtenidos, además de la disminución de tiempo absoluto y porcentual con respecto a la temperatura de secado para cada caso. Se puede observar que, en todos los casos, existe una disminución del tiempo de secado producida por la aplicación de microperforaciones, los cuales son de mayor magnitud a medida que la temperatura de secado es menor.

El trabajo de Araya et al., 2022 reporta resultados similares para un secado de rodajas de manzana "*Granny Smith*" en ventana refractiva a 70 °C con microperforaciones con láser CO_2. El control (muestras sin microperforaciones) se muestra un tiempo de secado de 102.5 minutos. Por otro lado, se observan valores entre 73.3 y 93.3 minutos para las muestras que fueron microperforadas, lo cual son ordenes de magnitud similares en comparación con los resultados obtenidos en esta investigación.

Además, a una configuración que presente un diámetro y/o densidad de poros menos se observar un efecto menos significativo en la reducción de los tiempos de secado. Esto se debe principalmente a que el orificio generado no permite la liberación suficiente de agua desde la matriz de la manzana, siendo este fenómeno mayor a un diámetro y densidad de poro mayor.

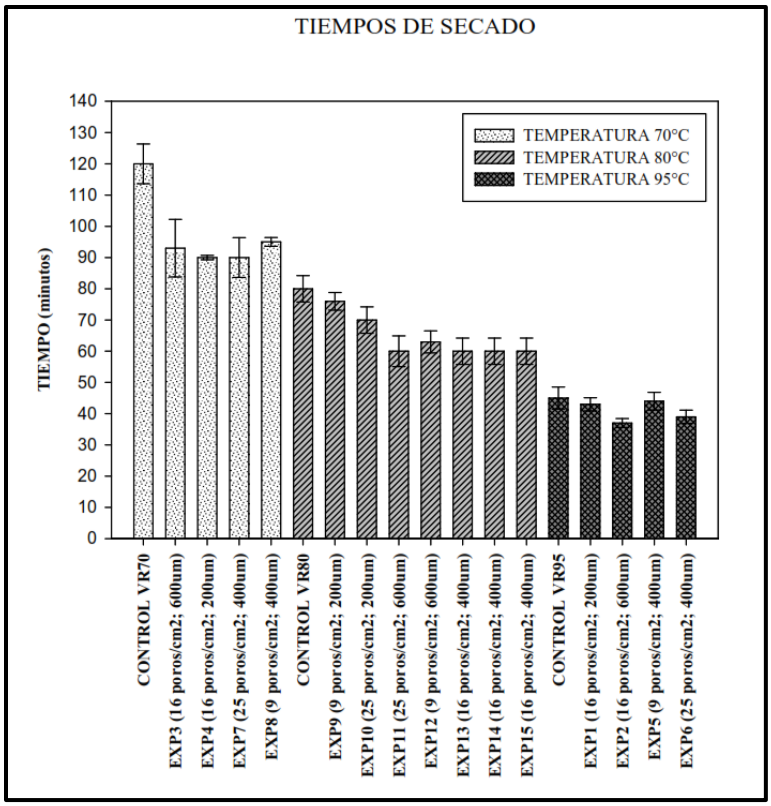


Figura 34 Tiempos de secado obtenidos en muestra con microperforaciones y experimentos control.

Tabla 11 Tiempo de secado de los experimentos controles y experimentos con microperforaciones.

Experimento	Tiempo (Minutos)	Reducción del tiempo	Disminución tiempo de secado
Control 70 °C	120 ± 6.4	-	-
3	93 ± 9.2	27	22.5%
4	90 ± 0.71	30	25.0%
7	90 ± 6.4	30	25.0%
8	95 ± 1.4	25	20.8%
Control 80 °C	80 ± 4.2	-	-
9	76 ± 2.8	4	5.0%
10	70 ± 4.2	6	12.5%
11	60 ± 4.9	16	25.0%
12	63 ± 3.5	13	21.3%
13-14-15	60 ± 4.2	16	25.0%
Control 95 °C	45 ± 3.5	-	-
1	43 ± 2.1	2	4.4%
2	37 ± 1.4	8	17.8%
5	44 ± 2.8	1	2.2%
6	39 ± 2.1	6	13.3%

Calculando el área expuesta de las microperforaciones para la menor (200 µm y 9 poros/cm^2) y la mayor (600 µm y 25 poros/cm^2) configuración de diámetro y densidad de poro, se obtiene un aumento en el área de transferencia entre 1,4% y 8,4%, respectivamente.

En la **Figura 35** se muestran las muestras de manzana fresca microperforadas con la respectiva configuración de diámetro y densidad de poro utilizada en cada experimento y, en la **Figura 36**, se muestran las muestras microperforadas después del proceso de secado.

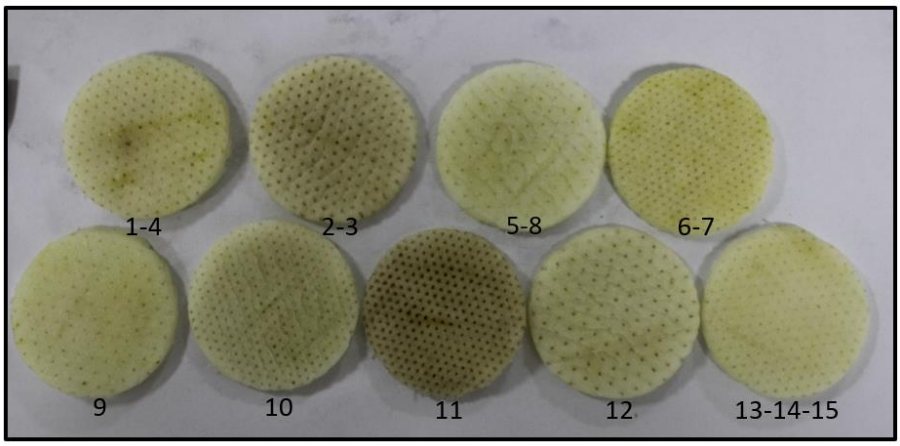


Figura 35 Muestras con microperforaciones en materia prima fresca enumeradas de acuerdo con el experimento que le corresponde.

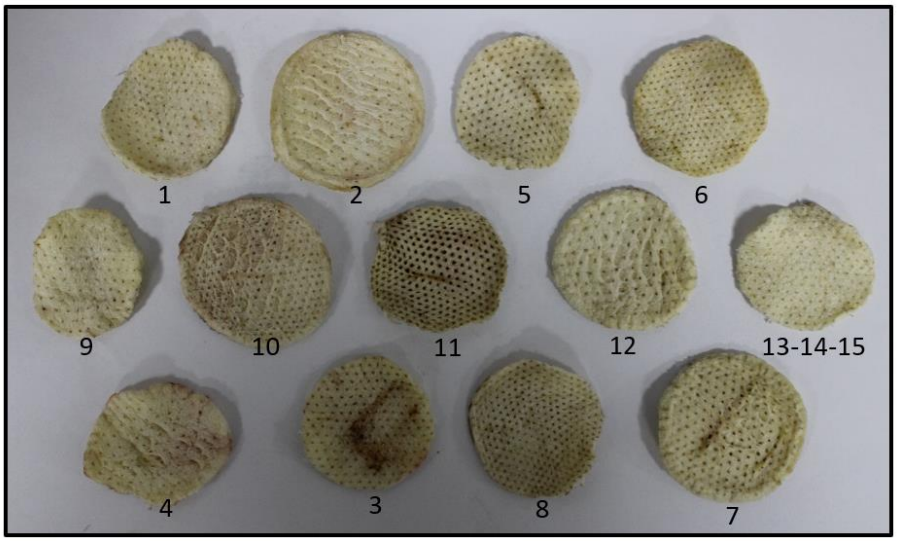


Figura 36 Muestras con microperforaciones después del secado, enumerados de acuerdo con el experimento que le corresponda.

4.1.2 Humedad

En la **Figura 37** se muestra los resultados obtenidos de humedad de las muestras perforadas y los experimentos controles. El mínimo valor corresponde al liofilizado 0.011 ± 0.001 g agua/g muestra y un máximo en el caso del experimento 6, 0.112 ± 0.005 g agua/g muestra.

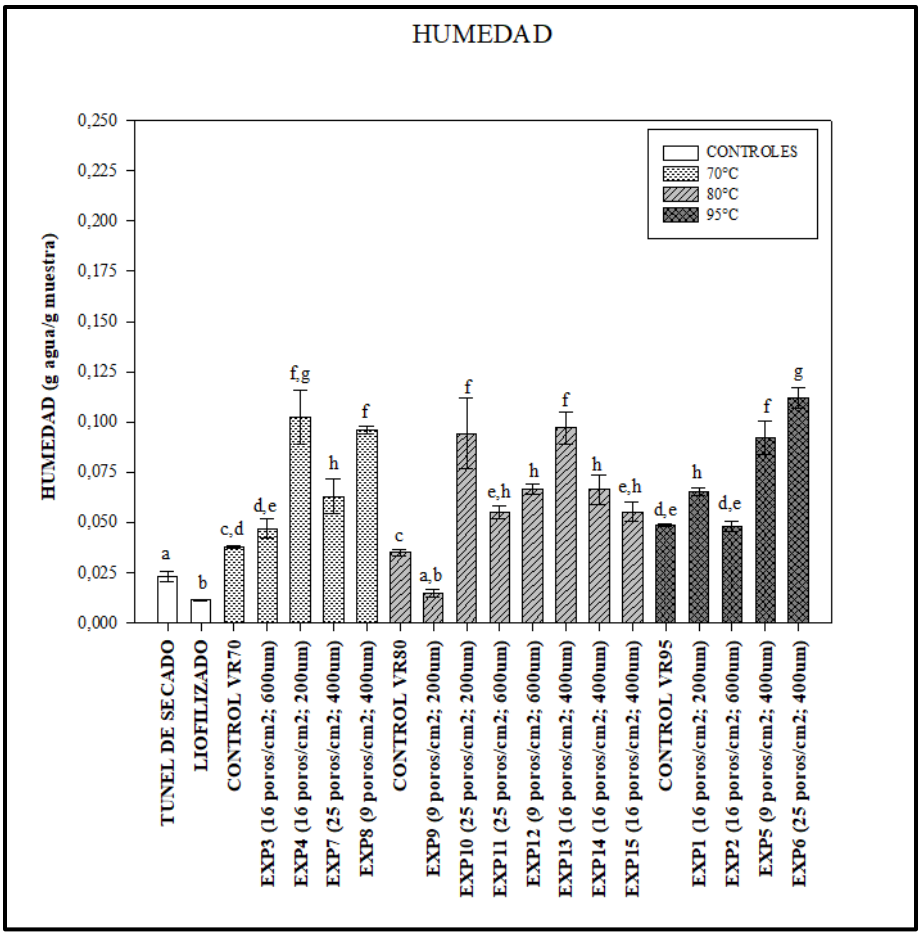


Figura 37 Humedad obtenida en muestra con microperforaciones y experimentos control.

Dado que el criterio principal para tener el secado fue la actividad de agua menor a 0.4, se puede aprecia diferencias con humedad finales de las muestras secadas, entre el rango aproximado de un 0.011 g agua/g muestra a un 0.110 g agua/g muestra. Si bien existe diferencias significativas entre las muestras, en el proceso de secado predomina el criterio de la actividad de agua.

Las diferencias entre las muestras se pueden deber a diversos factores, entre ellas la velocidad de secado que presenta (a mayor temperatura, la razón de secado de las muestras es mayor, dificultando que todos los experimentos serán similares) y la calibración en el instrumento que corta las muestras (la mandolina presenta dificultades para que todas las muestras utilizadas tengan la misma forma y espesor al cortar).

4.1.3 Actividad de agua

En la **Figura 38** se muestran los resultados de la actividad de agua obtenidos de las muestras microperforadas y los experimentos control. El mínimo valor corresponde al liofilizado, 0.2867 ± 0.0005, y un máximo en el caso del experimento 6, 0.4100 ± 0.0017;

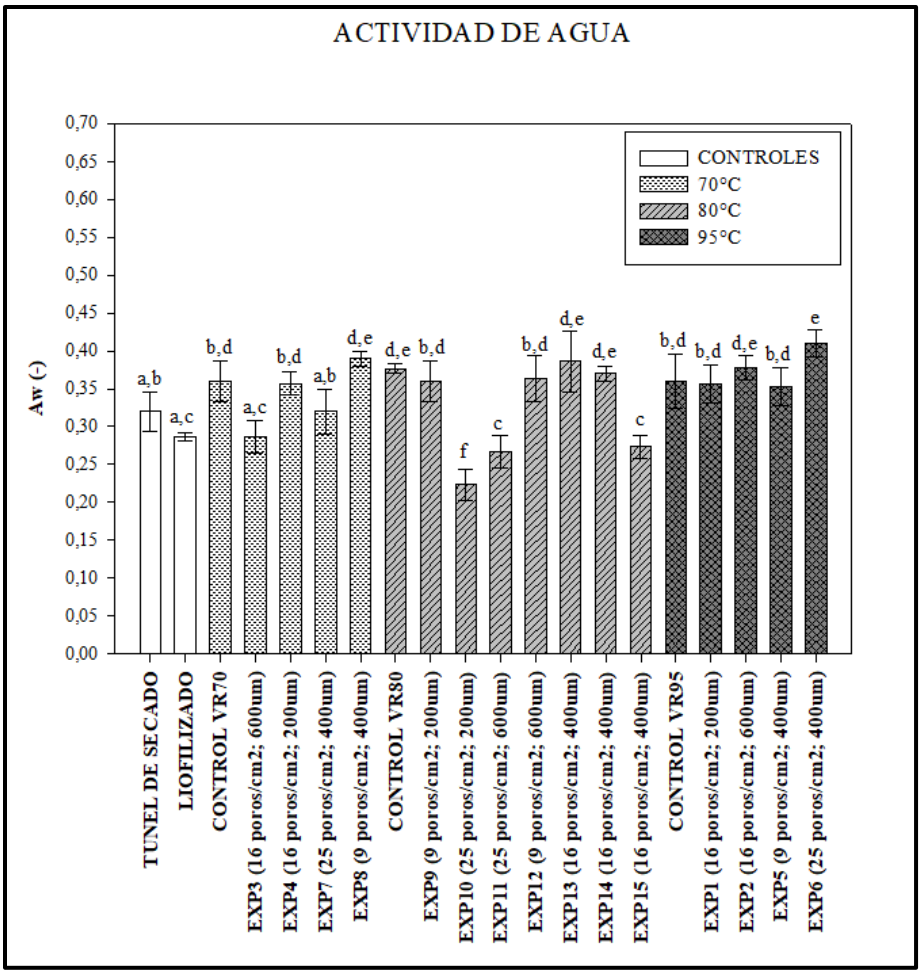


Figura 38 Actividad de agua obtenido en muestra con microperforaciones y experimentos control.

La actividad de agua presenta muestras la condición final de las muestras al finalizar el secado.

4.1.4 Solidos solubles totales

En la **Figura 39** se muestran los resultados de los sólidos solubles totales obtenidos de las muestras microperforadas y los experimentos control. El mínimo valor corresponde al experimento 3, 0.68 ± 0.05 g Xsst/g_{bs}, y un máximo en el caso del experimento 4, 0.90 ± 0.01 g Xsst/g_{bs}.

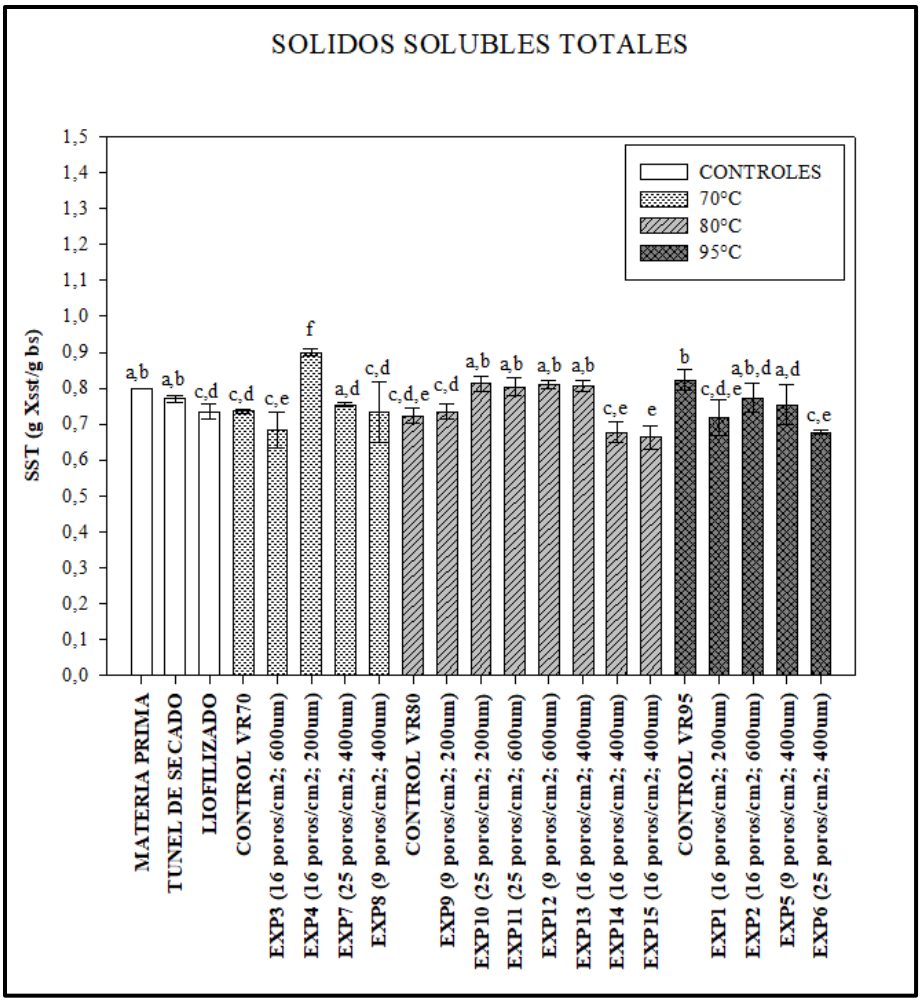


Figura 39 Solidos solubles totales obtenido en muestra con microperforaciones y experimentos control.

Este parámetro representa el nivel de solidos disueltos (entre ellos, azucares) presentes en las manzanas utilizadas y, por ende, el grado de madurez de estas en cada experimento. Dado que se utilizaron diferentes manzanas a lo largo del periodo de experimentación, se pueden observar las diferencias significativas entre los experimentos. Sin embargo, esto es la variabilidad inherente a la materia prima que presenta en la postcosecha, por lo que no es un factor que se pueda controlar.

4.1.5 Color

En la **Figura 40** se muestran los resultados de la diferencia de color obtenidos de las muestras microperforadas y los experimentos control. El mínimo valor corresponde al control a 80 °C, 4.317 ± 0.179, y un máximo en el caso del túnel de secado, 14.813 ± 0.780.

La referencia utilizada para apreciar la diferencia es las muestras de liofilizado, dado que es la mejor muestra en cuanto a propiedad de un producto final seco. De acuerdo el criterio de la norma ISO12647-2 sobre la estabilidad y el rango de color, se establece un diferencia significativa cuando ΔE > 5 (Pathare et al., 2013).

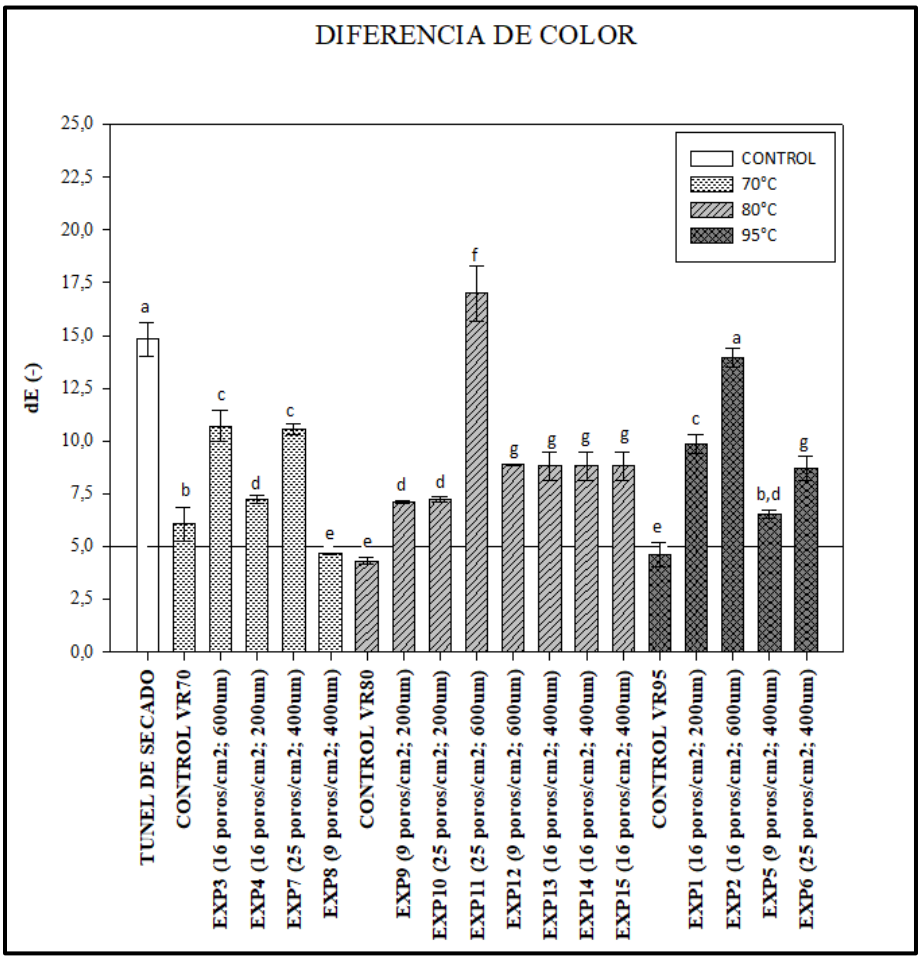


Figura 40 Diferencia de color obtenida en muestra con microperforaciones y experimentos control.

Kahraman et al., 2021 reporta un cambio de color de rodajas de manzana *Granny Smith* liofilizadas con respecto a la materia prima fresca de un 2.94, lo que muestra que no presenta diferencia significativa entre las muestras.

Araya et al., 2022 presenta un aumento de la diferencia de color obtenida entre las muestras microperforadas y su respectivo control, resultados que se encuentran entre 5.06 ± 1.85 y 6.37 ± 1.20. Estas diferencias son similares al orden de magnitud de la diferencia de color

reportadas en este trabajo, principalmente para las muestras que presenta una densidad de poro menor (dado que la máxima densidad de poro en el trabajo de Araya et al., 2022 es de 7.94 poros/cm^2).

Refiriéndose a los experimentos control, se puede observar que el túnel de secado afecta significativamente el color de las muestras secadas, en comparación con las muestras secadas a través de ventana refractiva, corroborando que este secado permite conservar de mejor manera las propiedades de la manzana. Además, se observa que, en el secado de ventana refractiva, a mayor temperatura de secado menor es la diferencia de color obtenida, lo cual permite deducir que ha altas temperatura se inactiva de mejor forma la enzima polifenoloxidasa. Esta enzima es la causante del pardeamiento enzima que ocurre en las frutas, oscureciendo a las misma y cambiado su color.

Exceptuando el experimento 8, todas las muestras perforadas presentan una diferencia de color perceptible.

En las muestras perforadas, se encuentra una diferencia de color significativa con respecto a las muestras control. Esto debido a que el diámetro y densidad de poros presenta una relación directamente proporcional con respecto a la diferencia de color de las muestras. Esto puede deberse a que los diámetros de poros de mayor tamaño presentan zonas quemadas por el láser, lo cual, combinado con una alta densidad de poro, aumenta la diferencia de color.

En la **Figura 41** se muestra un diagrama de Pareto estandarizado donde se expone el efecto que tiene cada variable del diseño experimental sobre la diferencia de color. Entre las variables que más afectan la diferencia de color obtenido está el diámetro de poro, la densidad de poro y la combinación de ambas variables, lo que hace aumentar el parámetro.

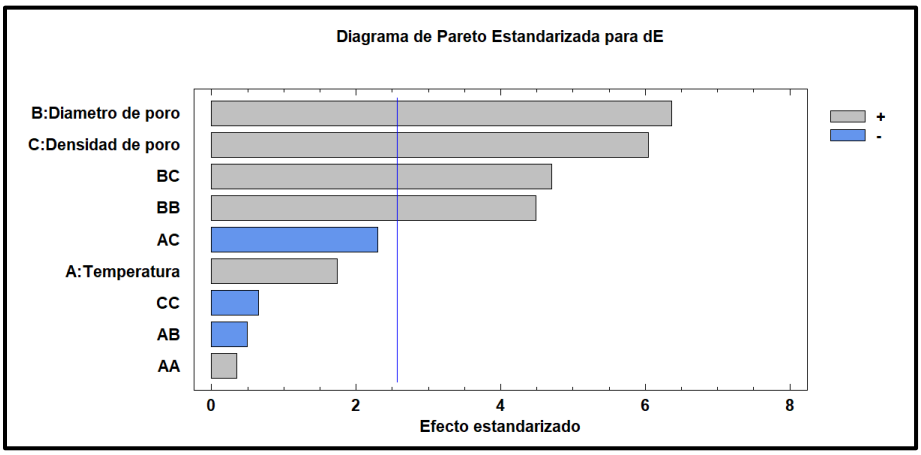


Figura 41 Diagrama de Pareto estandarizado para diferencia de color.

En la **Figura 42**, se expone el grafico de superficie de respuesta de la diferencia de color para las muestras microperforadas.

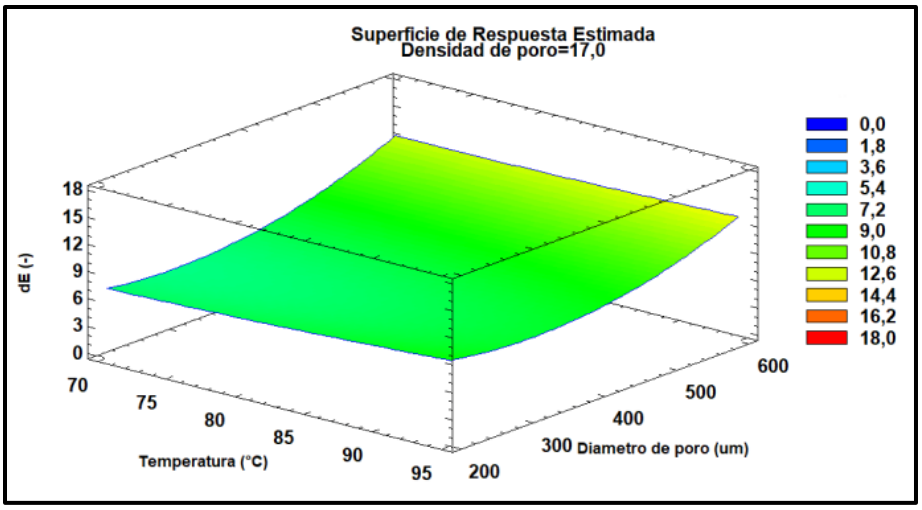


Figura 42 Superficie de respuesta de diferencia de color en muestra con microperforaciones.

El grafico fue ajustado de acuerdo con una regresión que presenta las interacciones de las variables del diseño experimental en la **Ecuación (8)**, cuyo coeficiente de ajuste R^2 fue de 96.32%.

$$\begin{aligned} dE(-) = {} & 1.07832 + 0.0858895 \cdot T - 0.054475 \cdot d_p + 0.83894 \cdot D_p + 0.00126 \cdot T^2 - 0.000101718 \cdot T \cdot d_p \\ & - 0.0118607 \cdot T \cdot D_p + 0.0000609419 \cdot d_p^2 + 0.00153097 \cdot d_p \cdot D_p - 0.00562004 \cdot D_p^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Donde T es la temperatura de operación, d_p es el diámetro del poro y D_p es la densidad de poro.

4.1.6 Textura

En la **Figura 43** se muestran los resultados de la dureza unitaria obtenidos de las muestras microperforadas y los experimentos control. El mínimo valor corresponde al experimento 3, 0.32 ± 0.05 N/mm, y un máximo en el caso del liofilizado, 2.43 ± 0.07 N/mm.

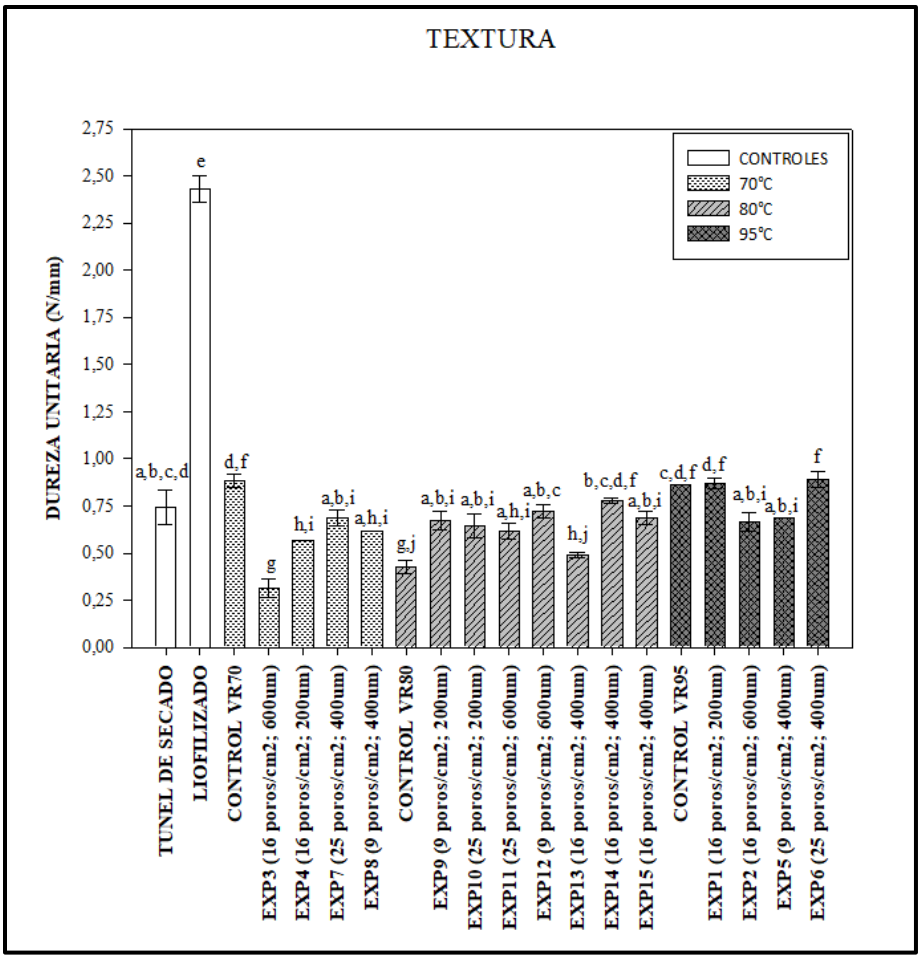


Figura 43 Textura unitaria obtenida en muestra con microperforaciones y experimentos control.

Como se puede observar en las muestras control, el liofilizado presenta la más alta textura dentro de las muestras secadas, esto debido a que, al no existir colapso de la estructura interna de la manzana en el proceso de secado, se mantiene la matriz solida de la manzana, la cual le entrega estabilidad a la estructura de las rodajas (Hua et al., 2010).

En general, en las manzanas secado por el resto de los métodos se aprecia una disminución de la textura debido al colapso de la estructura. Sin embargo, se puede apreciar el principal factor que afecta la dureza es la temperatura de operación del secado. Esto puede producirse ya que, al extraer más rápidamente el agua de las muestras, la estructura interna no colapsa completamente. Otra opción es que la exposición prolongada a la temperatura genere un cambio de estado en la matriz de las muestras, pasando de un estado vitreo a un estado gomoso (este fenómeno se puede observar en las diferencias que existe entre la dureza de los controles a diferentes temperaturas).

Con respecto a las microperforaciones presente en las muestras, se puede observar que no es un efecto predominando dentro de este análisis. Esto es principalmente porque las microperforaciones con láser CO_2 son localizadas y precisas, extrayendo una mínima cantidad de masa de las muestras, lo que afecta mínimamente su dureza.

Pese a lo anterior, la metodología utilizada presenta una gran variabilidad entre los experimentos, lo cual no permite generar una conclusión robusta respecto a la estructura y los efectos de cada factor en la dureza durante la compresión de las muestras.

4.1.7 Capacidad antioxidante

En la **Figura 44** se muestran los resultados de la capacidad antioxidante obtenidos de las muestras microperforadas y los experimentos control. El mínimo valor corresponde al control a 80 °C, 38.77 ± 2.00 µmol Trolox/g_{bs}, y un máximo en el caso del experimento 7, 93.66 ± 5.11 µmol Trolox/g_{bs}. La materia prima fresca presenta una capacidad antioxidante de 105.50 ± 8.10 µmol Trolox/g_{bs}.

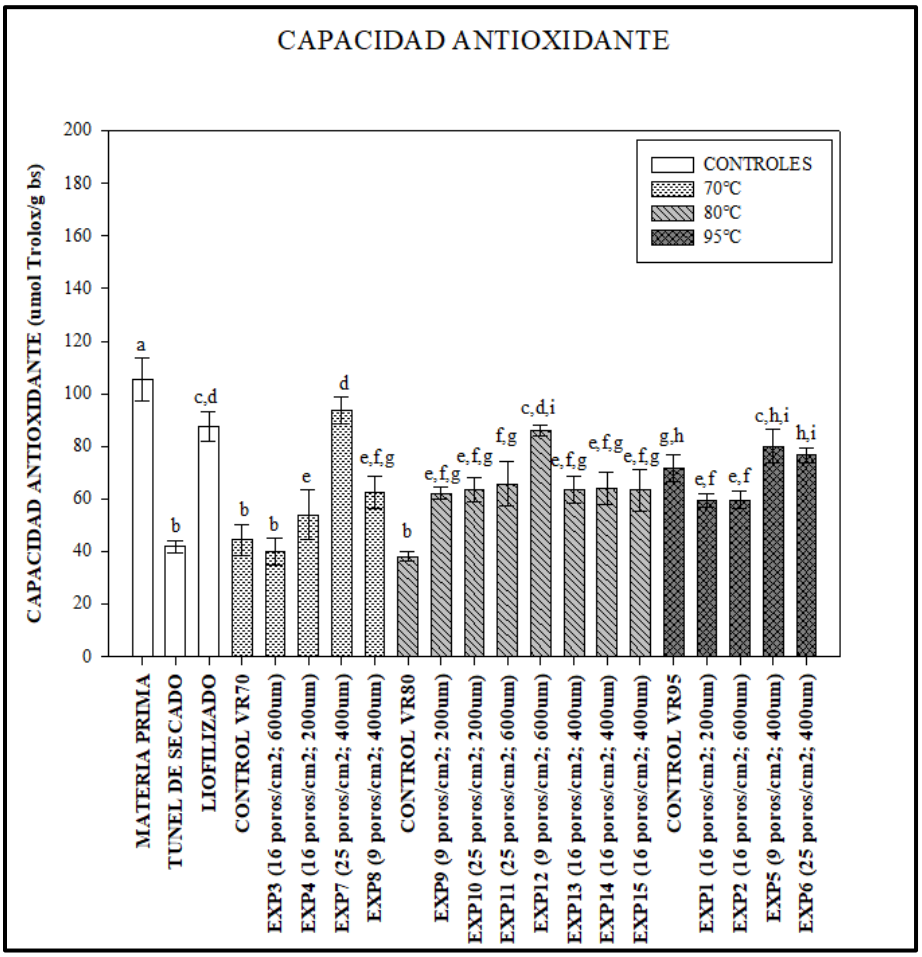


Figura 44 Capacidad antioxidante obtenida en muestra con microperforaciones y experimentos control.

Baeghbali et al., 2016 reporta resultados de secado en ventana refractiva a 91 °C de jugo de granada comparando con el secado a través de liofilizado y secado spray. Para la capacidad antioxidante obtiene que la ventana refractiva no presenta diferencia significativa con el secado a través del liofilizado. Con respecto al secado spray, si existe diferencias significativas, en la cual la ventana refractiva presenta mayor retención de capacidad antioxidante.

Por otro lado, Nayak et al., 2011 presenta los resultados del secado de hojuelas de diversas papas de colores a través de diferente métodos de secado como ventana refractiva a 95 °C, tambor de secado con vapor de agua a 145 °C y liofilizador. Los resultados obtenidos de capacidad antioxidante muestran que no existe diferencia significativa entre los métodos de secado

En los experimentos controles, se puede apreciar que el liofilizado es el mejor método de secado para retener la capacidad antioxidante con respecto a la materia prima. El túnel de secado y la ventana refractiva a 70 y 80 °C presenta la capacidad antioxidante más bajas de la serie de experimentos realizados. Por otro lado, la ventana refractiva a 95 °C presenta una retención de capacidad antioxidante mejor al resto de los experimentos control, exceptuando el liofilizado. Por lo tanto, la temperatura es un factor determinante en la retención de capacidad antioxidante en la ventana refractiva, siendo recomendable el uso de una temperatura de operación alta para mejor este parámetro.

En cuanto a las muestras perforadas, se puede observar en la superficie de respuesta que, a mayor diámetro y/o densidad de poro, existe una mayor retención de la capacidad antioxidante. Además, se puede apreciar que los experimentos 5, 7 y 12 presenta una misma capacidad antioxidante que las muestras liofilizadas Esto ocurre dado que, en una configuración donde predomine un densidad y diámetro de poros alta, permite acortar los tiempos de secado de manera significativa en comparación con una configuración de estos factores más bajas, disminuyendo la exposición térmica hacia la muestra y, por ende, disminuyendo la degradación de los componentes bioactivos con capacidad antioxidante presente en la manzana.

En la **Figura 45** se muestra un diagrama de Pareto estandarizado donde se expone el efecto que tiene cada variable del diseño experimental sobre la capacidad antioxidante. En este gráfico, se puede observar que la variable de densidad de poro es la variable más relevante, la cual hace aumentar la capacidad antioxidante. Por otro lado, la segunda variable que afecta el parámetro es el diámetro de poro, el hace que disminuya.

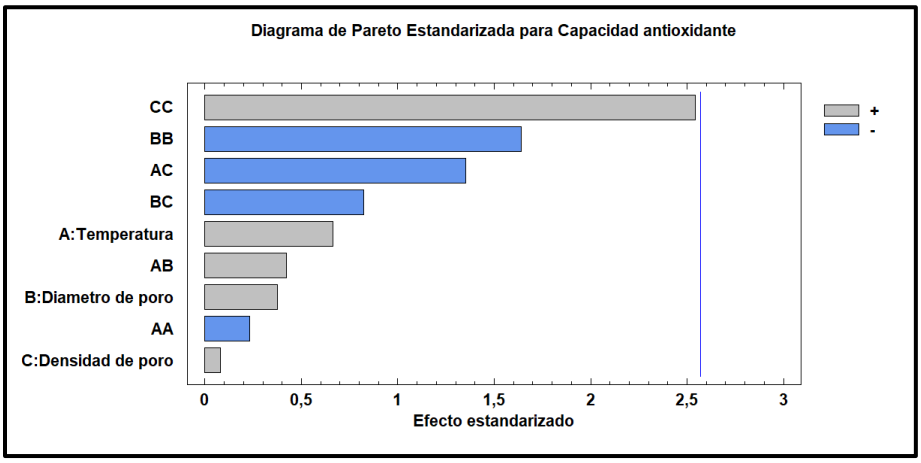


Figura 45 Diagrama de Pareto estandarizado para capacidad antioxidante.

En la **Figura 46**, se expone el grafico de superficie de respuesta de la capacidad antioxidante para las muestras microperforadas.

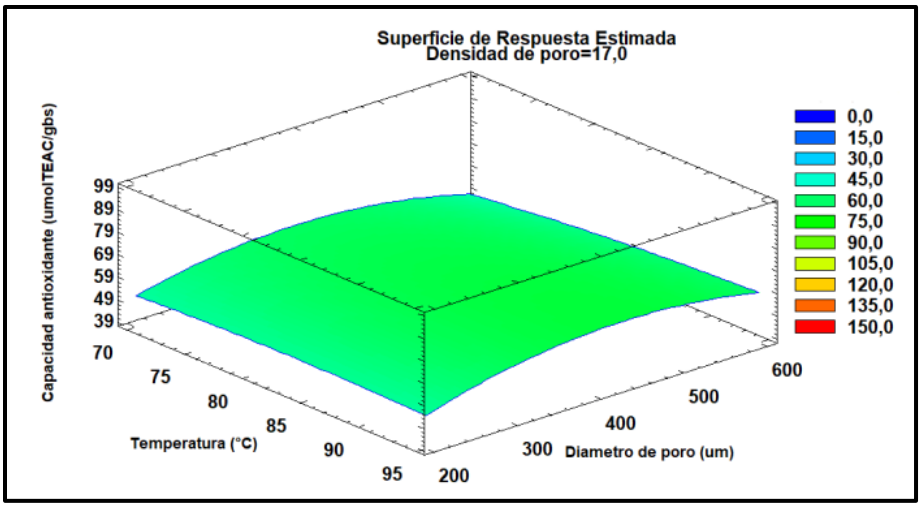


Figura 46 Superficie de respuesta de capacidad antioxidante en muestra con microperforaciones en unidades de µmol de Trolox equivalente por gramo de masa seca.

El grafico fue ajustado de acuerdo con una regresión que presenta las interacciones de las variables del diseño experimental en la **Ecuación (9)** cuyo coeficiente de ajuste R^2 fue de 73.05%.

$$\begin{aligned} \mathrm{Dpph}\left(\frac{\mu\mathrm{mol\ Trolox}}{g_{bs}}\right) &= -85{,}9094 + 2.67407 \cdot T + 0.174114 \cdot d_p - 0.688246 \cdot D_p - 0.00934256 \cdot T^2 \\ &+ 0.000961267 \cdot T \cdot d_p - 0.0765083 \cdot T \cdot D_p - 0.000244717 \cdot d_p^2 - 0.00293849 \cdot d_p \cdot D_p \\ &+ 0.241686 \cdot D_p^2 \end{aligned} \tag{9}$$

Donde T es la temperatura de operación, d_p es el diámetro del poro y D_p es la densidad de poros.

4.1.8 Contenido de polifenoles totales

En la **Figura 47** se muestran los resultados del contenido de polifenoles totales obtenidos de las muestras microperforadas y los experimentos control. El mínimo valor corresponde al experimento 1, 6.59 ± 0.26 mg GAE/g_{bs}, y un máximo en el caso del experimento 12, 12.49 ± 0.40 mg GAE/g_{bs}. La materia prima fresca presenta una capacidad antioxidante de 16.80 ± 0.82 mg GAE/g_{bs}.

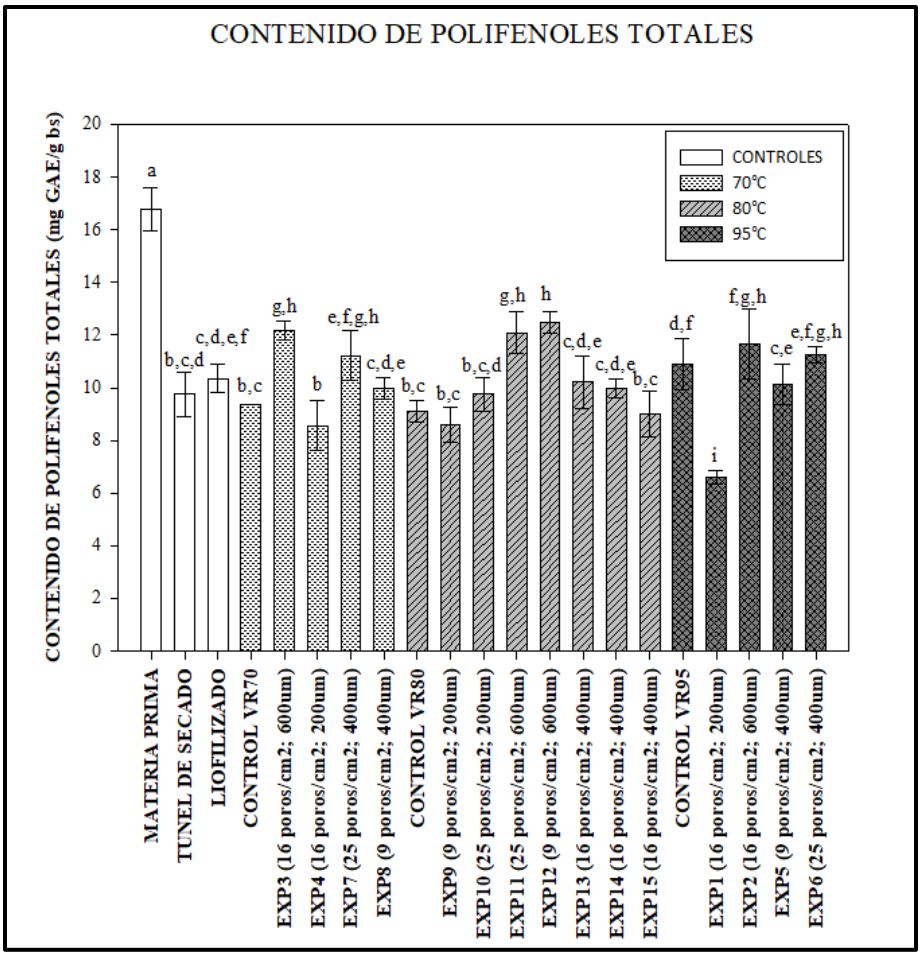


Figura 47 Contenido de polifenoles totales obtenida en muestra con microperforaciones y experimentos control.

Análogamente al caso de capacidad antioxidante, Baeghbali et al., 2016 reporta resultados de contenido de polifenoles totales para el secado de jugo de granada, los cuales presentan diferencia significativa entre el secado por ventana refractiva y liofilizado, siendo menor de ellos la ventana refractiva. Sin embargo, la ventana refractiva presenta una mejor retención de este parámetro en comparación a secado por spray.

En otro caso, Nayak et al., 2011 reporta el resultado del contenido de polifenoles totales del secado de papas de colores, en el secado que presenta mayor contenido de polifenoles totales es el secado a través de ventana refractiva; entre el secado por liofilizador y tambor no existieron diferencia significativas.

En el experimento control, se puede observar que, entre el túnel de secado, el liofilizado y la ventana refractiva a 70 y 80 °C no existen diferencias significativas; por otro lado, entre el liofilizado, túnel de secado y la ventana refractiva a 95 °C no existen diferencias significativas. Si bien las muestras expuestas presentan el mismo contenido de polifenoles totales, puede existir la posibilidad que el perfil de polifenoles presentes sea diferente, especialmente en los experimentos que presentan temperatura cercanas 70 °C y tiempos prolongados; esta condición puede generar

pardeamiento no-enzimático, debido a la generación de productos de la reacción de Maillard. Este fenómeno es un proceso complejo que consiste en la reducción de azucares y proteínas producidas por la exposición térmica de los alimentos. A pesar de que el alcance del presente trabajo no indagada en esta reacción, esta puede ser una hipótesis que permita explicar la similitud en cuanto a los polifenoles de los experimentos controles y su diferencia en la capacidad antioxidante.

En la **Figura 48** se muestra un diagrama de Pareto estandarizado donde se expone el efecto que tiene cada variable del diseño experimental sobre el contenido de polifenoles totales. Como se puede observar, la principal variable que afecta el parámetro es el diámetro de poro, el cual hace que aumente. La segunda variable que afecta el contenido de polifenoles totales es la densidad de poro, la que también hace que aumente.

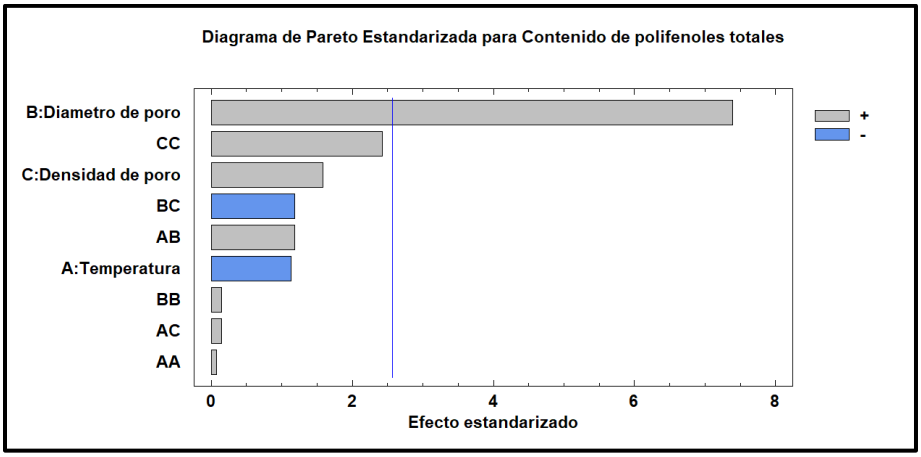


Figura 48 Diagrama de Pareto estandarizado para el contenido de polifenoles totales.

En la **Figura 49**, se expone el grafico de superficie de respuesta del contenido de polifenoles totales para las muestras microperforadas.

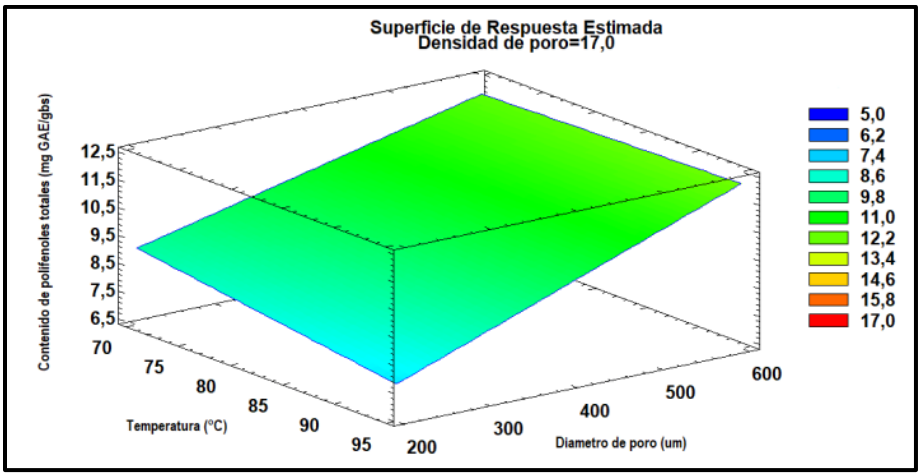


Figura 49 Superficie de respuesta de contenido de polifenoles totales en muestra con microperforaciones en unidades de miligramos de ácido gálico equivalente por gramo de masa seca.

El grafico fue ajustado de acuerdo con una regresión que presenta las interacciones de las variables del diseño experimental en la **Ecuación (10)**, cuyo coeficiente de ajuste R^2 fue de 93.20%.

$$\mathrm{PFT}\left(\frac{\mathrm{mg\ GAE}}{\mathrm{g_{bs}}}\right) = 16{,}9753 - 0.128035 \cdot \mathrm{T} - 0.00094598 \cdot \mathrm{d_p} - 0.372169 \cdot \mathrm{D_p} + 0.000182173 \cdot \mathrm{T}^2 + 0.000166205 \cdot \mathrm{T} \cdot \mathrm{d_p} + 0.000508693 \cdot \mathrm{T} \cdot \mathrm{D_p} + 0.00000138068 \cdot \mathrm{d_p^2} - 0.000262509 \cdot \mathrm{d_p} \cdot \mathrm{D_p} + 0.0142741 \cdot \mathrm{D_p^2} \tag{10}$$

Donde T es la temperatura de operación, $\mathrm{d_p}$ es el diámetro del poro y $\mathrm{D_p}$ es la densidad de poro.

Análogamente a los resultados de la capacidad antioxidante, se puede aprecias una relación directamente proporcional entre la retención del contenido de polifenoles totales y un mayor diámetro y/o densidad de poros. Las razones son similares; al reducir los tiempos de operación en los secados, se disminuye la exposición térmica de las muestras y, por lo tanto, la degradación térmica de los polifenoles presentes en los mismo.

4.2 ALMACENAMIENTO ACELERADO

4.2.1 Criterio para selección de muestras

Para la selección de las muestras perforadas en el ensayo de almacenamiento, se utilizó los resultados entregados en la sección anterior de la diferencia de color en las muestras, la capacidad antioxidante y el contenido de los polifenoles totales, buscando los 3 mejores candidatos que cumple la mayor cantidad de parámetros.

Dado que no existe un criterio estandarizado para la selección de estas muestras, se utilizó rango en las cuales se puede tolerar o no las muestras seleccionadas, de acuerdo con el parámetro que corresponda. Para el caso del color, se utiliza como valor de referencia el valor en el cual se puede apreciar alguna diferencia perceptible (5), siendo el mínimo valor de las muestras seleccionadas un 50% más del valor de referencia (5.7), y el máximo valor en un 80% más del valor de referencia (9). En el caso de la capacidad antioxidante, el valor de referencia que se utilizó es el resultado obtenido de la manzana fresca (105.00 µmol Trolox/g_{bs}), siendo el mínimo valor el 50% de este valor (52.50 µmol Trolox/g_{bs}), y el máximo valor el 80% de este valor (84.00 µmol Trolox/g_{bs}). En el caso de la capacidad antioxidante, análogo a la capacidad antioxidante, el valor de referencia que se utilizó es el resultado obtenido de la manzana fresca (16.80 mg GAE/g_{bs}), siendo el mínimo valor el 50% de este valor (8.40 mg GAE/g_{bs}), y el máximo valor el 70% de este valor (11.76 mg GAE/g_{bs}).

Dado que el experimento 8 es el único experimento que presenta una diferencia de color no perceptible, se incluye dentro de los candidatos para el ensayo de almacenamiento acelerado.

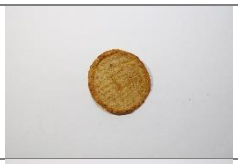
El experimento 6 se utilizó para el ensayo de almacenamiento acelerado, ya que presenta uno de los perfiles de capacidad antioxidante y polifenoles más alto entre la serie de experimentos, además de presentar una diferencia de color dentro del criterio de selección referido anteriormente.

Dado un error en la selección (corrección de datos posterior a la selección para almacenamiento), se seleccionó el experimento 2 para el ensayo de almacenamiento acelerado, pese a que no sería una opción de acuerdo con el criterio dado de diferencia de color; aun así, las muestras de este experimento presentan una capacidad antioxidante y contenido de polifenoles totales alta de acuerdo con la serie de experimentos.

4.2.2 Cambio visible en las muestras en el tiempo

En la **Tabla 12** se muestran los cambios visibles en la apariencia de las muestras perforadas que fueron selecciones y los experimentos controles en ventana refractiva.

Tabla 12 Cambio de apariencia de las muestras perforadas seleccionadas y los experimentos control en el ensayo de almacenamiento acelerado.

EXPERIMENTOS	SEMANA 1	SEMANA 2	SEMANA 3	SEMANA 4
Control 70 °C				
Control 80 °C				
Control 95 °C				
2				
6				
8				

4.2.3 Humedad

En la **Figura 50** se muestran los resultados de la humedad de las muestras microperforadas seleccionadas y los experimentos control obtenido a través de ensayo de almacenamiento acelerado.

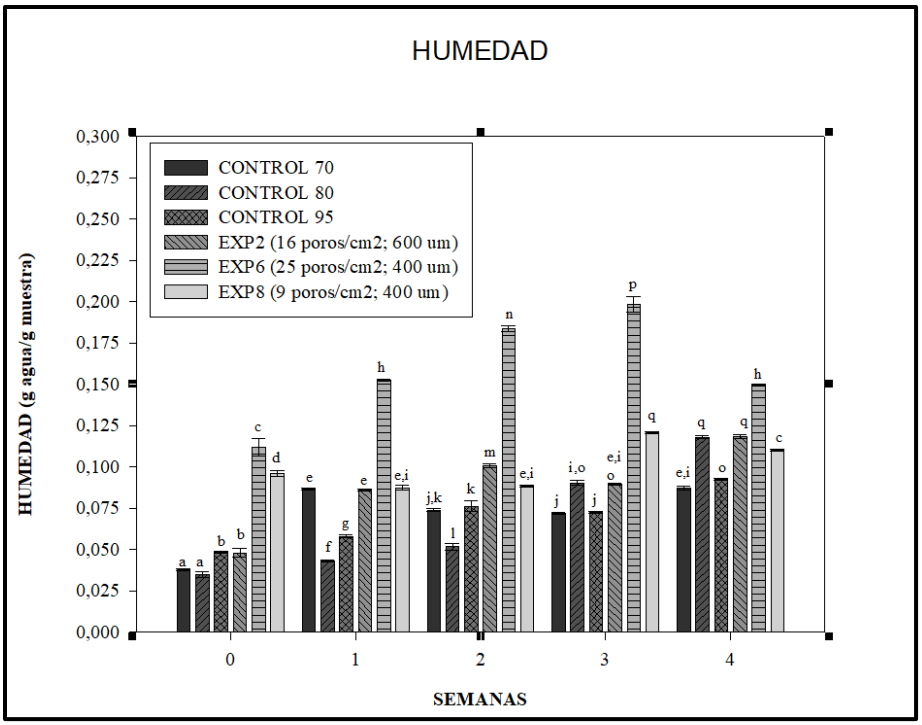


Figura 50 Humedad obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo.

En la **Tabla 13** se muestra los valores promedio de humedad de las muestras almacenadas y su diferencia porcentual con respecto a la semana 0.

Tabla 13 Valores promedio de humedad para muestras almacenadas en el tiempo y diferencia porcentual que existe con respeto a la semana 0.

Semana	**0**		**1**		**2**		**3**		**4**	
Muestra	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ
Control 70	0.038	-	0.087	130%	0.074	96%	0.072	90%	0.087	132%
Control 80	0.035	-	0.043	24%	0.052	48%	0.090	158%	0.118	237%
Control 95	0.049	-	0.058	19%	0.076	57%	0.073	49%	0.092	90%
2	0.048	-	0.086	80%	0.101	110%	0.089	86%	0.118	147%
6	0.112	-	0.152	36%	0.184	64%	0.199	77%	0.150	34%
8	0.096	-	0.087	-9%	0.088	-8%	0.121	26%	0.110	15%

Como se puede aprecias en el gráfico de humedad, existen un aumento progresivo del contenido de agua de las muestras a lo largo del tiempo, siendo este mayor en algunas muestras que en otras.

A través de la tabla expuesta, se puede observar que los experimento control 70 y 80 °C, así como el experimento 2, presenta un mayor aumento de la humedad en sus muestras.

La difusión de agua desde la atmosfera controla de ensayo de almacenamiento hacia las bolsas de aluminio es un fenómeno normal, dado que no son envases completamente herméticos. Sin embargo, los casos anteriormente nombrados, permite deducir que existían bolsas con imperfección que permitían el paso de agua hacia el producto. Otra hipótesis para justificar lo expuesta es que existieron muestras colocadas en las bolsas que presentaban una mayor humedad que el resto, alterando aún más la humedad de las muestras, a pesar de la difusión normal del agua.

4.2.4 Actividad de agua

En la **Figura 51** se muestran los resultados de la actividad de agua obtenidos de las muestras microperforadas seleccionadas y los experimentos control obtenido a través de ensayo de almacenamiento acelerado.

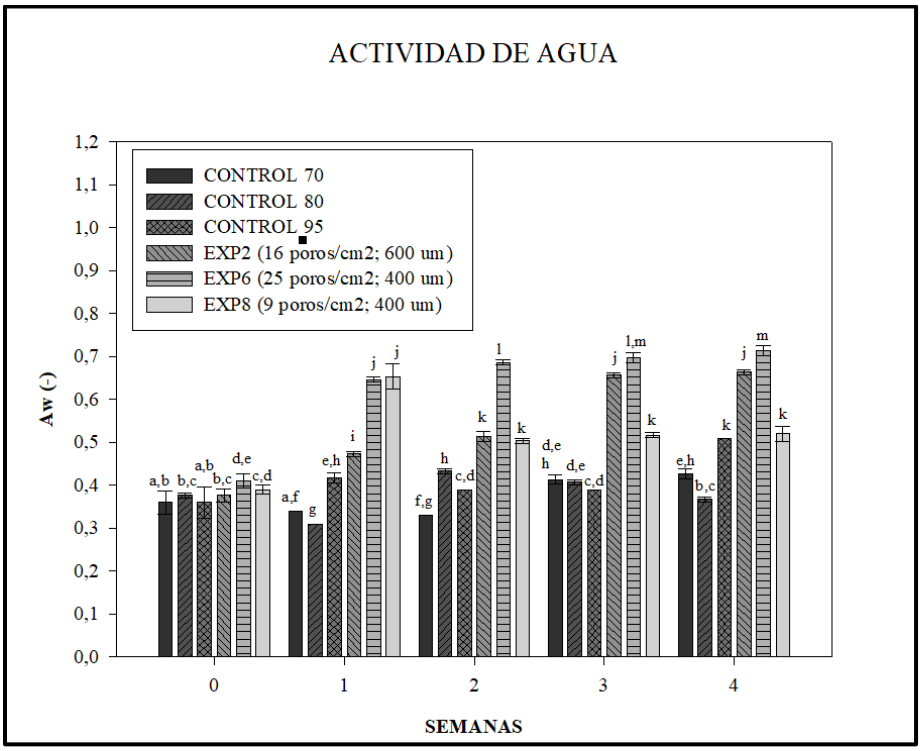


Figura 51 Actividad de agua obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo.

En la **Tabla 14** se muestra los valores promedio de actividad de agua de las muestras almacenadas y su diferencia porcentual con respecto a la semana 0.

Tabla 14 Valores promedio de actividad de agua para muestras almacenadas en el tiempo y diferencia porcentual que existe con respeto a la semana 0.

Semana	**0**		**1**		**2**		**3**		**4**	
Muestra	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ
Control 70	0.3600	-	0.3400	-6%	0.3300	-8%	0.4133	15%	0.4267	19%
Control 80	0.3767	-	0.3100	-18%	0.4333	15%	0.4067	8%	0.3667	-3%
Control 95	0.3600	-	0.4167	16%	0.3900	8%	0.3900	8%	0.5100	42%
2	0.3767	-	0.4733	26%	0.5133	36%	0.6567	74%	0.6633	76%
6	0.4100	-	0.6467	58%	0.6867	67%	0.6967	70%	0.7133	74%
8	0.3900	-	0.6533	68%	0.5033	29%	0.5167	32%	0.5200	33%

A través del grafico de actividad de agua, se puede observar que las muestras perforadas presentan un aumento significativo de la actividad de agua que en el caso de las muestras control. Esto se avala al analizar el aumento porcentual a través de las semanas, expuesto en la **Tabla 14**.

Este fenómeno presenta relación con la difusión de agua hacia las bolsas, como se explicó anteriormente en el caso de la humedad medida.

Pese a que existe variación entre los porcentajes de aumento de la actividad de agua entre semana, se puede deducir que las muestras perforadas, al presentar una mayor área expuesta, tienen más agua libre en su superficie que las muestras control, debido a la exposición de la matriz de la manzana seca a la atmosfera de la bolsa. Esto hace que, en un periodo de tiempo prolongado, las muestras perforadas sean susceptibles a la actividad microbiana y a reacciones químicas. Este fenómeno es más significativo para muestras que presenten una configuración de diámetro y/o densidad de poro más alta (como el caso entre los experimentos 2 y 6 comparándolo con el experimento 8).

4.2.5 Solidos solubles totales

En la **Figura 52** se muestran los resultados de los sólidos solubles totales obtenidos de las muestras microperforadas seleccionadas y los experimentos control obtenido a través de ensayo de almacenamiento acelerado.

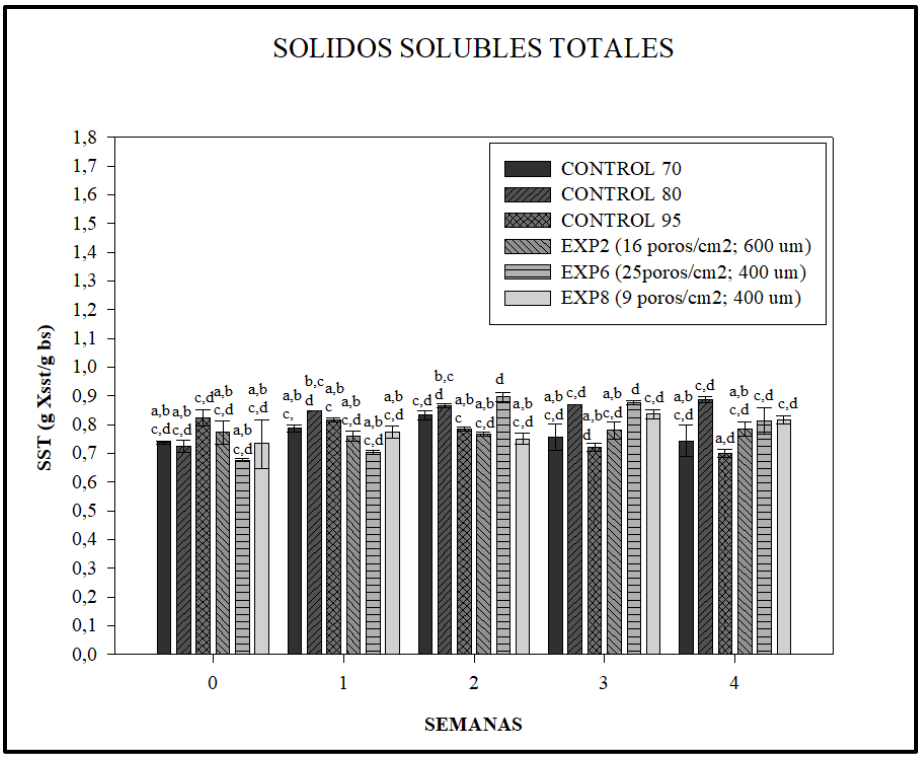


Figura 52 Solidos solubles totales obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo.

Como se aprecia en el gráfico, las muestras se comportan de manera similar entre ellas, ya que el principal factor que afecta a los sólidos solubles totales es la madurez de la manzana utilizada en la experimentación. Por ende, la variabilidad observada es inherente a la materia prima utilizada.

4.2.6 Color

En la **Figura 53** se muestran los resultados de la diferencia de color obtenidas de las muestras microperforadas seleccionadas y los experimentos control obtenido a través de ensayo de almacenamiento acelerado.

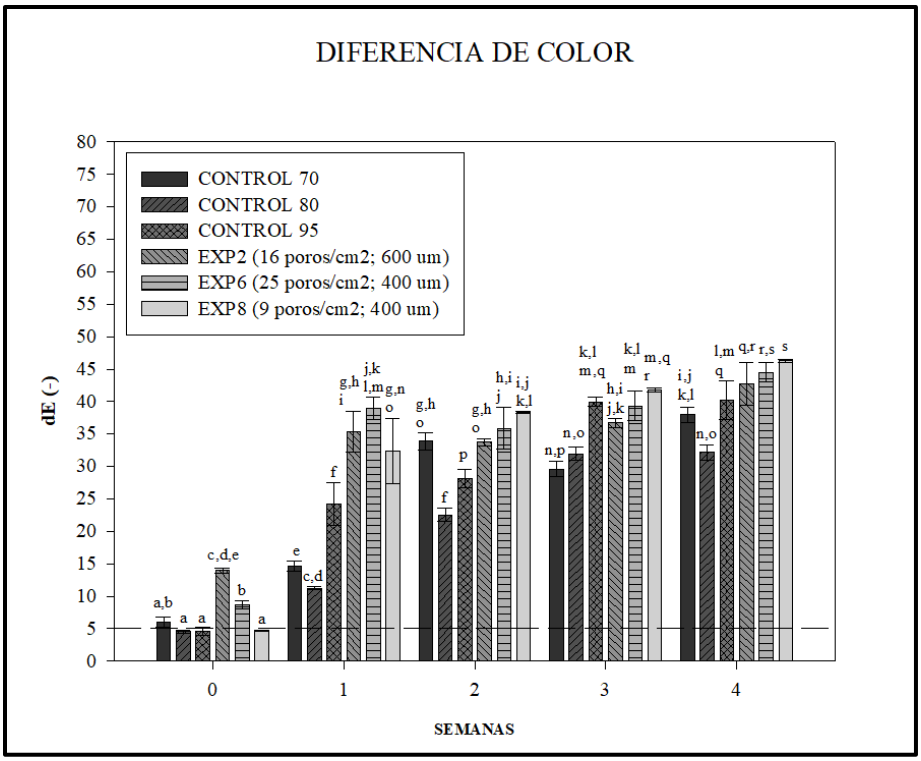


Figura 53 Diferencia de color obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo.

En la **Tabla 15** se muestra los valores promedio de la diferencia de color de las muestras almacenadas y su diferencia porcentual con respecto a la semana 0.

Tabla 15 Valores promedio de diferencia de color para muestras almacenadas en el tiempo y diferencia porcentual que existe con respeto a la semana 0.

Semana	**0**		**1**		**2**		**3**		**4**	
Muestra	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ
Control 70	6.07	-	14.68	142%	33.85	457%	29.57	387%	37.99	526%
Control 80	4.32	-	11.23	160%	22.54	422%	31.96	640%	32.17	645%
Control 95	4.60	-	24.22	426%	28.17	512%	39.92	767%	40.20	773%
2	13.94	-	35.36	154%	33.70	142%	36.73	164%	42.73	207%
6	8.68	-	38.98	349%	35.86	313%	39.31	353%	44.53	413%
8	4.66	-	32.35	594%	38.36	723%	41.80	797%	46.28	893%

A través del grafico presentado, se puede apreciar un aumento de la diferencia de color en todos los experimentos. Este cambio de color se puede observar cómo pardeamiento de las muestras, como se expuso en la **Tabla 12**. En todas las muestras, desde la semana 1, se observa un cambio de color perceptible (diferencia de color mayor a 5).

Observando la magnitud porcentual de cambio de color en la tabla anteriormente expuesta, se puede observar que existe una diferencia en el comportamiento del color en las muestras control

comparada con las muestras perforadas. Las muestras control presentan una razón de cambio de color menor que las muestras perforadas; esto puede ser debido a que la matriz sin incisiones de las muestras secas protege de las reacciones producidas por las enzimas, la presencia de agua y la temperatura en el almacenamiento, evitando, a un corto plazo, que se genera un pardeamiento más significativo que en las muestras perforadas.

Otra observación que se puede hacer con los datos disponibles es que, en las muestras control, a una mayor temperatura de secado se genera una menor diferencia de color, pero, en el almacenamiento, las muestras secadas a 95 °C presentan un cambio mayor de color que las muestras a las otras temperaturas. Esto hace de estas muestras sea más susceptibles a los factores externos y/o al tiempo de almacenamiento. Esto se puede deber a que las muestras secadas a 95 °C presentan una mejor retención de los componentes bioactivos, los cuales tiene más posibilidades de reaccionar con las condiciones ambientes y a la reactivación de enzimas (por ejemplo, la polifenoloxidasa).

En cuanto a las muestras perforadas, se observa un aumento de la diferencia de color mayor que las muestras control, específicamente en la primera y segunda semana. Este comportamiento es similar al fenómeno que se observa en las muestras control secada a 95 °C, pero presenta una explicación adicional a la mejora en la retención de componentes bioactivos en la matriz; otro factor que influye en este aumento es la exposición que tienen los componentes de la muestra seca dado el aumento del área de transferencia de materia. El caso que presenta menos aumento de la diferencia de color es el experimento 2, pero este caso es debido a que la base de comparación en la semana 0 es superior al resto de los experimentos.

A un largo plazo, todas las muestras expuestas al ensayo alcanzan un orden a magnitud similar en cuanto a la diferencia de color, aunque se observa una mayor diferencia en las muestras que fueron perforadas.

4.2.7 Textura

En la **Figura 54** se muestran los resultados de textura obtenidos de las muestras microperforadas seleccionadas y los experimentos control obtenido a través de ensayo de almacenamiento acelerado.

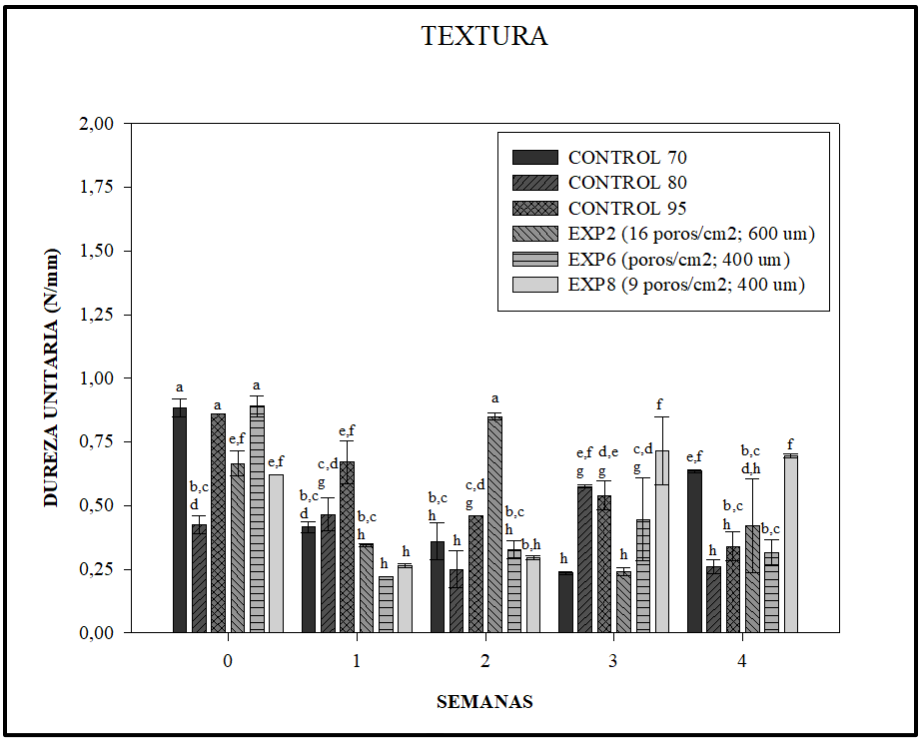


Figura 54 Textura unitaria obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo.

En la **Tabla 16** se muestra los valores promedio de la dureza unitaria de las muestras almacenadas y su diferencia porcentual con respecto a la semana 0.

Tabla 16 Valores promedio de dureza unitaria para muestras almacenadas en el tiempo y diferencia porcentual que existe con respeto a la semana 0.

Semana	**0**		**1**		**2**		**3**		**4**	
Muestra	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ
Control 70	0.89	-	0.42	-53%	0.36	-59%	0.24	-73%	0.64	-28%
Control 80	0.43	-	0.47	9%	0.25	-41%	0.58	35%	0.26	-39%
Control 95	0.86	-	0.67	-22%	0.46	-47%	0.54	-37%	0.34	-60%
2	0.67	-	0.35	-48%	0.85	28%	0.24	-64%	0.42	-37%
6	0.89	-	0.22	-75%	0.33	-63%	0.45	-50%	0.32	-65%
8	0.62	-	0.27	-57%	0.30	-52%	0.72	15%	0.70	12%

Analizando el grafico y la tabla presentados, se puede apreciar que, al final de almacenamiento acelerado, en todos los experimentos existe una disminución de la dureza medida, exceptuando el experimento 8. Pese a ellos, el comportamiento de las durezas entre semanas presenta una alta variabilidad entre semanas y experimentos, lo cual no permite concluir la relación entre las condiciones del ensayo, la aplicación de perforaciones y su comparación con las muestras control.

Este problema en el análisis puede deberse a diferentes razones. Entre ellas, puede afectar el aumento de humedad de las muestras almacenadas al avanzar las semanas, la variabilidad misma del instrumento de medición y la metodología utilizada.

4.2.8 Capacidad antioxidante

En la **Figura 55** se muestran los resultados de la capacidad antioxidante obtenidos de las muestras microperforadas seleccionadas y los experimentos control obtenido a través de ensayo de almacenamiento acelerado.

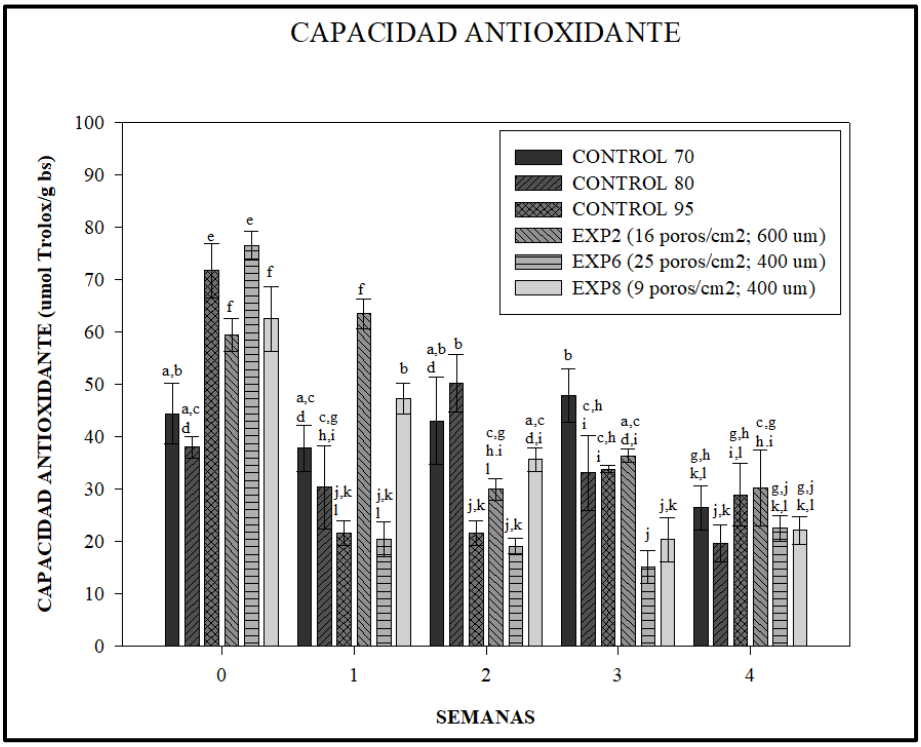


Figura 55 Capacidad antioxidante obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo.

En la **Tabla 17** se muestra los valores promedio de la capacidad antioxidante de las muestras almacenadas y su diferencia porcentual con respecto a la semana 0.

Tabla 17 Valores promedio de capacidad antioxidante para muestras almacenadas en el tiempo y diferencia porcentual que existe con respeto a la semana 0.

Semana	**0**		**1**		**2**		**3**		**4**	
Muestra	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ
Control 70	44.457	-	37.820	-15%	43.020	-3%	47.853	8%	26.457	-40%
Control 80	38.077	-	30.393	-20%	50.250	32%	33.153	-13%	19.590	-49%
Control 95	71.733	-	21.650	-70%	36.537	-49%	33.817	-53%	28.917	-60%
2	59.503	-	63.550	7%	29.943	-50%	36.423	-39%	30.213	-49%
6	76.580	-	20.390	-73%	19.173	-75%	15.230	-80%	22.560	-71%
8	62.527	-	47.283	-24%	35.687	-43%	20.373	-67%	22.160	-65%

En el grafico expuesta se puede apreciar una disminución de la capacidad antioxidante de las muestras a lo largo del tiempo. En el ensayo, se puede observar que, en la semana 1, las muestras del control a 70 y 80 °C y experimento 2 no presenta una disminución significativa con respecto a la semana anterior. En la semana 2, las muestras de los controles a 70 y 95 °C y las muestras del experimento 6 se mantiene sin variación significativas con respecto a la semana anterior. En la semana 3, las muestras control a 70 °C se mantiene sin una variación significativa a la semana anterior, así como los experimento 2 y 6. Finalmente, en la semana 4, las muestras de los experimentos 2 y 8 no muestras disminuciones significativas de la capacidad antioxidante con respecto a la semana anterior. Cabe mencionar que la muestra control a 95 °C y el experimento 6 presenta un aumento de la capacidad antioxidantes en la semana 3 y 4, respectivamente.

En la tabla mostrada anteriormente, se puede observar que, en la semana 4, todas las muestras presentan un orden a magnitud similar en la diferencia porcentual con respecto a la semana 0, siendo las muestras con mayor pérdida de capacidad antioxidantes son las que presenta microperforaciones (especialmente en el experimento 6 y 8). Así, las muestras control a las temperaturas 70 y 80 °C son las muestras que mayor estabilidad tiene en las primeras semanas, destacando la muestra control a 70°C, que mantiene su capacidad antioxidante sin diferencia significativas hasta la semana 4. En cuanto a las muestras perforadas, se puede apreciar que una configuración de diámetro y/o densidad de poro más baja (como es el caso del experimento 8), presenta un cambio de su capacidad antioxidante menor a las otras muestras perforadas.

Uno de los principales problemas que se evidencia en los datos expuesto es el aumento de la capacidad antioxidante de algunas muestras en determinadas semanas, lo cual supondría una interferencia producida por la temperatura de operación del almacenamiento. Pese a ello, al estar todas las muestras sometidas a este efecto, se puede aprecia por igual los cambio que se producen a largo plazo con respecto de la semana inicial.

4.2.9 Contenido de polifenoles totales

En la **Figura 56** se muestran los resultados del contenido de polifenoles totales obtenidos de las muestras microperforadas seleccionadas y los experimentos control obtenido a través de ensayo de almacenamiento acelerado.

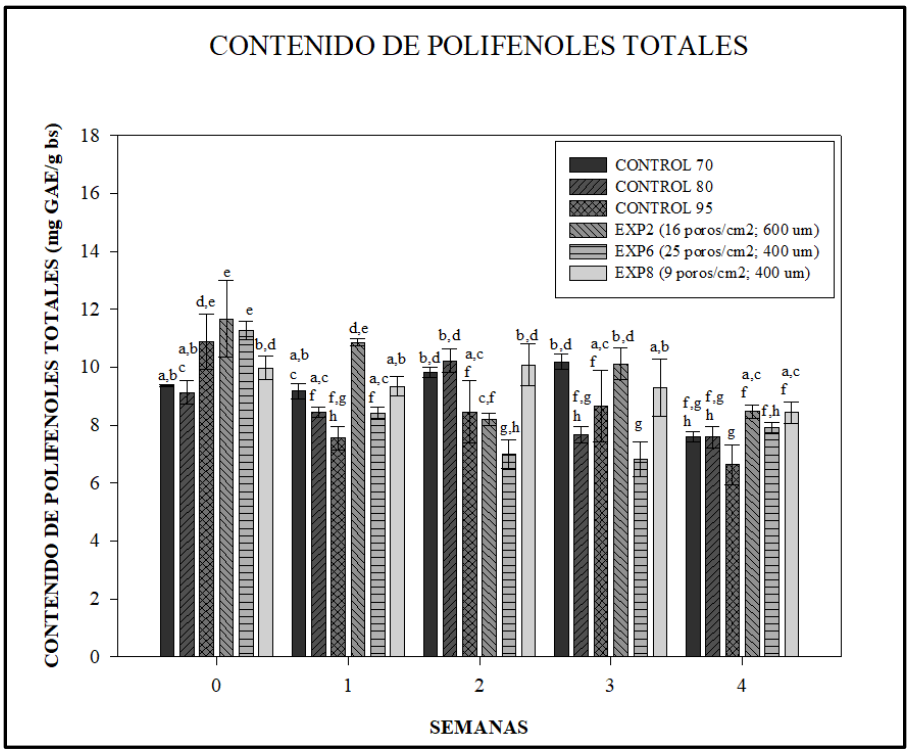


Figura 56 Contenido de polifenoles totales obtenida en almacenamiento acelerado en muestras con microperforaciones y experimentos control a través de ventana refractiva a lo largo del tiempo.

En la **Tabla 18** se muestra los valores promedio del contenido de polifenoles totales de las muestras almacenadas y su diferencia porcentual con respecto a la semana 0.

Tabla 18 Valores promedio de contenido de polifenoles totales para muestras almacenadas en el tiempo y diferencia que existe con respeto a la semana 0.

Semana	**0**		**1**		**2**		**3**		**4**	
Muestra	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ	Valor	%Δ
Control 70	9.363	-	9.173	-2%	9.827	5%	10.187	9%	7.600	-19%
Control 80	9.130	-	8.440	-8%	10.230	12%	7.680	-16%	7.583	-17%
Control 95	10.880	-	7.550	-31%	8.457	-22%	8.663	-20%	6.627	-39%
2	11.670	-	10.863	-7%	8.197	-30%	10.117	-13%	8.477	-27%
6	11.263	-	8.420	-25%	6.997	-38%	6.827	-39%	7.907	-30%
8	9.973	-	9.343	-6%	10.077	1%	9.307	-7%	8.437	-15%

En el grafico expuesto, se presenta la degradación de los polifenoles en las muestras almacenadas, las cuales disminuyen a lo largo de semanas. Observando por semana, en la semana 1, solo las muestras del control a 70 °C y experimentos 2 y 8 no presentan una disminución significativa con respecto a la semana anterior. En la semana 2, las muestras de los controles a 70, 80 y 95 °C, y las muestras del experimento 8 se mantiene sin variación significativas con respecto a la semana anterior. En la semana 3, se mantiene igual a la semana anterior las muestras control a 70 °C, así como las del experimento 6 y 8; cabe destacar que en esta semana se aprecia un

aumento en los polifenoles de las muestras del experimento 2. Finalmente, en la semana 4, las muestra control a 70 y 95 °C más los experimentos 2 y 6 disminuyen su capacidad antioxidante; las muestras restantes no presentan una variación significativa con respecto a su semana anterior.

De acuerdo con la tabla mostrada, se puede observar que las muestras secadas a una temperatura de 95 °C presentan una mayor disminución al término del ensayo de su contenido de los polifenoles totales que la muestras que fueron secadas a las otras temperaturas; esto se observa tanto en las muestras control como en la muestra perforada. Esto se puede deber a que la presencia de una mayor cantidad de componentes bioactivos que están expuesto a las condiciones de almacenamiento. Por lo tanto, las muestras que fueron secadas a una temperatura de 70 y 80 °C presentan una mayor estabilidad con respecto a la retención de polifenoles en el almacenamiento. Análogo al caso de la capacidad antioxidante, las muestras perforadas con una configuración de diámetro y/o densidad de poro más baja (como es el caso del experimento 8), presenta un cambio menor a las otras muestras perforadas.

Al igual que en el caso de la capacidad antioxidantes, se puede evidenciar un aumento del contenido de polifenoles totales en algunas muestras en determinadas semanas, las cuales puede deberse al efecto de la temperatura de almacenamiento a la que están expuestas las muestras.

5. CONCLUSIONES

En la presente investigación, se puede concluir que la tecnología de secado por ventana refractiva a 95 °C presenta una retención similar de las propiedades de la manzana comparado con el liofilizado, siendo la mayor distinción la dureza de las muestras obtenidas.

La aplicación de microperforación con tecnología de laser de CO_2 en un snack de manzanas *Granny Smith* permite disminuir los tiempos de secado en el equipo de ventana refractiva, especialmente a temperatura de operación de 70 y 80 °C. Además, permite mejorar la retención de la capacidad antioxidante y el contenido de polifenoles totales, específicamente en las configuraciones que presenta una temperatura de 95 °C, un diámetro de 600 µm y/o densidad de poro de 25 poros/cm^2; esto debido a una menor exposición térmica de las muestras en el secado. Aun así, al utilizar estas configuraciones de microperforaciones en las muestras, aumenta la diferencia de color perceptible, lo cual es más significativo a medido que el diámetro y/o densidad de poro aumenta. En cuanto a la dureza de las muestras microperforadas, este análisis no fue concluyen.

Pese a lo anteriormente mencionado, a través del ensayo de almacenamiento acelerado, se pudo comprobar que las muestras microperforadas con un diámetro y densidad de poro alta (600 µm y/o 25 poros/cm^2) y que fueron secadas a temperaturas altas (95 °C) presentan una degradación de la capacidad antioxidantes y del contenido de polifenoles totales más acelerada en comparación a otra configuración a lo largo de tiempo. Esto hace que esta opción, si bien presenta propiedades interesantes después del secado, no entrega productos finales estables durante el almacenamiento a mediano y largo plazo.

Dado la anterior, una configuración de diámetro y densidad de poro baja (200 o 400 µm y 9 poros/cm^2), secadas a una temperatura de operación de 70 °C, es una alternativa interesante y factible, ya que permite disminuir el tiempo de secado de manera significativa, manteniendo así las propiedades en términos de color, capacidad antioxidante y contenido de polifenoles totales después del secado y durante un almacenamiento prolongado. De igual forma, la configuración entregada puede no ser la más optima, dado que este aspecto escapa de las competencias de la investigación.

6. RECOMENDACIONES

De las conclusiones anteriormente expuestas y la experiencia adquirida en el presente trabajo, se puede extraer una serie de recomendaciones para investigaciones futuras, con el fin de mejorar la calidad de los posteriores trabajados que se realizaran en el Laboratorio de Alimentos y Bioprocesos. Las recomendaciones son las siguientes:

- Pretratamiento: Como se menciona en la metodología, se utilizó un pretratamiento por pH para inhibir el pardeamiento de las muestras frescas, a través una solución que contiene acido ascórbico y cítrico. Esta solución puede aportar o alterar capacidad antioxidante y contenido de polifenoles totales a las muestras, por la naturaleza de las especies acidas. Por lo mismo, se sugiere utilizar otro tipo de pretratamiento, como puede ser el escaldado de las muestras en agua calienta, la que permite desactivar el pardeamiento enzimático sin aportar capacidad antioxidante ni polifenoles.
- Almacenamiento acelerado: Como se pudo observar en los resultados de almacenamiento acelerado, existen muestras que presentaron un aumento de la capacidad antioxidante y del contenido de polifenoles totales. Puede existir diversos factores de que ocurra esto, pero uno de ellos puede ser la temperatura de operación de ensayo de almacenamiento acelerado. Por lo mismo, se sugiere utilizar otras temperaturas de operación más bajas, tales como 35 o 40 °C. Además, se sugiere, para otras investigaciones, el uso de diferentes temperaturas de almacenamiento para el cálculo de la energía de activación y la vida útil de los productos finales, con respecto a la degradación de propiedades definidas (tales como la capacidad antioxidante y le contenido de polifenoles totales).
- Sellado de las bolsas: Dado que existió difusión de agua en las bolsas, se recomienda cambiar el sellado tipo ziplot de las mismas por un sellado térmico, para impedir el paso de agua hacia la bolsa.
- Análisis sensorial: Dado que la finalidad de este trabajo es generar un producto alimentario, sería interesante agregar un panel de evaluación sensorial para recopilar datos sensoriales de la calidad de las diferentes muestras obtenidas de la investigación, para obtener así una apreciación subjetiva por parte de los consumidores.

7. REFERENCIA

Araya, E., Nuñez, H., Ramírez, N., Jaques, A., Simpson, R., Escobar, M., Escalona, P., Vega-Castro, O., & Ramírez, C. (2022). Exploring The Potential Acceleration of Granny Smith Apple Drying By Pre-Treatment With CO2 Laser Microperforation. *Food and Bioprocess Technology*, *15*(2), 391–406. https://doi.org/10.1007/s11947-022-02763-x

Baeghbali, V., Niakousari, M., & Farahnaky, A. (2016). Refractance Window drying of pomegranate juice: Quality retention and energy efficiency. *Lwt*, *66*, 34–40. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.017

Boyer, J., & Liu, R. H. (2004). Apple phytochemicals and their health benefits. *Nutrition Journal*, *3*(1), 1–15. https://doi.org/10.1186/1475-2891-3-5

Castoldi, M., Zotarelli, M. F., Durigon, A., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2015). Production of Tomato Powder by Refractance Window Drying. *Drying Technology*, *33*(12), 1463–1473. https://doi.org/10.1080/07373937.2014.989327

Chen, L., & Opara, U. L. (2013). Texture measurement approaches in fresh and processed foods - A review. *Food Research International*, *51*(2), 823–835. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.01.046

Chou, S. K., & Chua, K. J. (2001). New hybrid drying technologies for heat sensitive foodstuffs. *Trends in Food Science and Technology*, *12*(10), 359–369. https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00102-9

Dong Chen, X., & Mujumdar, A. S. (2008). *Drying Technologies in Food Processing*. Blackwell.

Donno, D., Mellano, M. G., Riondato, I., De Biaggi, M., Andriamaniraka, H., Gamba, G., & Beccaro, G. L. (2019). Traditional and unconventional dried fruit snacks as a source of health-promoting compounds. *Antioxidants*, *8*(9), 1–15. https://doi.org/10.3390/antiox8090396

Ferraz, A. C. O., Mittal, G. S., Bilanski, W. K., & Abdullah, H. A. (2007). Mathematical modeling of laser based potato cutting and peeling. *BioSystems*, *90*(3), 602–613. https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2007.01.004

Figueroa, C., Ramírez, C., Núñez, H., Jaques, A., & Simpson, R. (2020). Application of vacuum impregnation and CO2-laser microperforations in the potential acceleration of the pork marinating process. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *66*(June), 102500. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102500

Fujimaru, T., Ling, Q., & Morrissey, M. T. (2012). Effects of Carbon Dioxide (CO2) Laser Perforation as Skin Pretreatment to Improve Sugar Infusion Process of Frozen Blueberries. *Journal of Food Science*, *77*(2), 45–51. https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02525.x

Gaebler, F., & Büchter, E. (2010). CO2 Laser System Enhances Food Packaging. *Laser Technik Journal*, *7*(5), 39–41. https://doi.org/10.1002/latj.201090076

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. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 208). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.002

Halliwell, B. (1996). Antioxidants in Human Health and Disease. *Annual Review of Nutrition*, *16*(1), 33–50. https://doi.org/10.1146/annurev.nutr.16.1.33

Harborne, J., Baxter, H., & Moss, G. (1999). *Phytochemical Dictionary. A hanbook of Bioactive Compounds from Plants* (Second). CRC Press.

Howard R. Moskowitz, I. Sam Saguy, T. S. (2009). *An Integrated Approach to New Food Product Development*.

Hua, T. C., Liu, B. L., & Zhang, H. (2010). Freeze-Drying of Pharmaceutical and Food Products. In *Freeze-Drying of Pharmaceutical and Food Products*. https://doi.org/10.1533/9781845697471

Huang, D., Boxin, O. U., & Prior, R. L. (2005). The chemistry behind antioxidant capacity assays. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *53*(6), 1841–1856. https://doi.org/10.1021/jf030723c

Hyson, D. A. (2011). A comprehensive review of apples and apple components and their relationship to human health. *Advances in Nutrition*, *2*(5), 408–420. https://doi.org/10.3945/an.111.000513

İzli, G. (2017). Total phenolics, antioxidant capacity, colour and drying characteristics of date fruit dried with different methods. *Food Science and Technology*, *37*(1), 139–147. https://doi.org/10.1590/1678-457X.14516

Kahraman, O., Malvandi, A., Vargas, L., & Feng, H. (2021). Drying characteristics and quality attributes of apple slices dried by a non-thermal ultrasonic contact drying method. *Ultrasonics Sonochemistry*, *73*, 105510. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105510

Keast, D. R., O'Neil, C. E., & Jones, J. M. (2011). Dried fruit consumption is associated with improved diet quality and reduced obesity in US adults: National Health and Nutrition Examination Survey, 1999-2004. *Nutrition Research*, *31*(6), 460–467. https://doi.org/10.1016/j.nutres.2011.05.009

Konica Minolta. (2022). *Entendiendo el espacio de color CIELab*. https://sensing.konicaminolta.us/mx/blog/entendiendo-el-espacio-de-color-cie-lab/

Lawless, H., & Heymann, H. (2010). Sensory Evaluation of Food. In *Springer* (Seond). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6488-5

Mabberley, D., Jarvis, C., & Juniper, B. (2001). The name of the apple. *Telopea*, *9*(2), 421–428. https://doi.org/10.7751/telopea20013014

Macheix, J., Fleuriet, A., & Billot, J. (2018). *Fruit Phenolics*. CRC Press.

Mujumdar, A. S. (2020). Handbook of Industrial Drying. In *Handbook of Industrial Drying*. https://doi.org/10.1201/9780429289774

Munzenmayer, P., Ulloa, J., Pinto, M., Ramirez, C., Valencia, P., Simpson, R., & Almonacid, S. (2020). Freeze-drying of blueberries: Effects of carbon dioxide (CO2) laser perforation as skin pretreatment to improve mass transfer, primary drying time, and quality. *Foods*, *9*(2), 1–18. https://doi.org/10.3390/foods9020211

Nayak, B., Berrios, J. de J., Powers, J. R., Tang, J., & Ji, Y. (2011). Colored potatoes (Solanum tuberosum L.) dried for antioxidant-rich value-added foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, *35*(5), 571–580. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2010.00502.x

Nindo, C. I., & Tang, J. (2007). Refractance window dehydration technology: A novel contact drying method. *Drying Technology*, *25*(1), 37–48. https://doi.org/10.1080/07373930601152673

Nireesha, G., Divya, L., Sowmya, C., Venkateshan, N., Niranjan Babu, M., & Lavakumar, V. (2013). Lyophilization/Freeze Drying -An Review. *Ijntps*, *3*(4), 87–98.

Ochoa-Martínez, C. I., Quintero, P. T., Ayala, A. A., & Ortiz, M. J. (2012). Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window^{TM} technique. *Journal of Food Engineering*, *109*(1), 69–75. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.09.032

Oficina de Estudios y Politicas Agrarias. (2021a). *Boletin de fruta, diciembre 2021*. https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-de-fruta-diciembre-2021

Oficina de Estudios y Politicas Agrarias. (2021b). *Estadisticas productivas*. https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/estadisticas-productivas

Olivares, J., Nuñez, H., Ramírez, C., Jaques, A., Pinto, M., Fuentes, L., Almonacid, S., Vega-Castro, O., & Simpson, R. (2021). Application of moderate electric fields and CO2-laser microperforations for the acceleration of the salting process of Atlantic salmon (Salmo salar). *Food and Bioproducts Processing*, *125*, 105–112. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.10.014

Ortiz-Jerez, M. J., Gulati, T., Datta, A. K., & Ochoa-Martínez, C. I. (2015). Quantitative understanding of Refractance Window^{TM} drying. *Food and Bioproducts Processing*, *95*, 237–253. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2015.05.010

Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Said, F. A. J. (2013). Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, *6*(1), 36–60. https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9

Prior, R. L., Wu, X., & Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *53*(10), 4290–4302. https://doi.org/10.1021/jf0502698

Raghavi, L. M., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2018). Refractance window drying of foods: A review. *Journal of Food Engineering*, *222*, 267–275. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.032

Ratti, C. (2001). Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review. *Journal of Food Engineering*, *49*(4), 311–319. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00228-4

Ruiz-Torralba, A., Guerra-Hernández, E. J., & García-Villanova, B. (2018). Antioxidant capacity, polyphenol content and contribution to dietary intake of 52 fruits sold in spain. *CYTA - Journal of Food*, *16*(1), 1131–1138. https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1517828

Saclier, M., Peczalski, R., & Andrieu, J. (2010). Effect of ultrasonically induced nucleation on ice crystals' size and shape during freezing in vials. *Chemical Engineering Science*, *65*(10), 3064–3071. https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.01.035

Saftner, R., Abbott, J., Bhagwat, A., & Vinyard, B. (2005). Qualities of Food Quality Measurement of Intact and Fresh-cut Slices of Fuji , Granny Smith , Pink Lady , and GoldRush Apples. *JOURNAL OF FOOD SCIENCE*, *70*.

Silva-Vera, W., Avendaño-Muñoz, N., Nuñez, H., Ramírez, C., Almonacid, S., & Simpson, R. (2020). CO2 laser drilling coupled with moderate electric fields for enhancement of the mass transfer phenomenon in a tomato (Lycopersicon esculentum) peeling process. *Journal of Food Engineering*, *276*, 109870. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109870

Soham, S. (2011). Freeze drying process: A review. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, *2*(12), 3061–3068. https://ijpsr.com/bft-article/freeze-drying-process-a-review/?view=fulltext

Spengler, R. N. (2019). Origins of the apple: The role of megafaunal mutualism in the domestication of Malus and rosaceous trees. *Frontiers in Plant Science*, *10*(May), 1–18. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00617

SYNRAD. (2022). *SYNRAD a Novanta Company*. https://synrad.com/en/CO2_Laser_Selection_Guide

Vasylieva, N., & James, H. (2021). Production and trade patterns in the world apple market. *Innovative Marketing*, *17*(1), 16–25. https://doi.org/10.21511/im.17(1).2021.02

Vega-Mercado, H., Marcela Góngora-Nieto, M., & Barbosa-Cánovas, G. V. (2001). Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*, *49*(4), 271–289. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00224-7

Veloso, G., Simpson, R., Núñez, H., Ramírez, C., Almonacid, S., & Jaques, A. (2021). Exploring the potential acceleration of the osmotic dehydration process via pretreatment with CO2-LASER microperforations. *Journal of Food Engineering*, *306*(March), 1–8. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110610

Witteman, W. J. (1987). The CO2 Laser. In *Angewandte Chemie International Edition, 6(11), 951–952*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo. https://doi.org/10.1007/978-3-540-47744-0

Zarein, M., Samadi, S. H., & Ghobadian, B. (2015). Investigation of microwave dryer effect on energy efficiency during drying of apple slices. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *14*(1), 41–47. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.06.002

Zotarelli, M. F., Carciofi, B. A. M., & Laurindo, J. B. (2015). Effect of process variables on the drying rate of mango pulp by Refractance Window. *Food Research International*, *69*, 410–417. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.01.013

8. ANEXO

8.1 RESULTADOS DE MUESTRAS CON MICROPERFORACION LASER CO_2

MUESTRA	HUMEDAD (g agua/g muestras)	AW (-)	STT (g Xsst/gbs)	COLOR (-)	TEXTURA UNITARIA (N/mm)	DPPH (µmol Trolox/g_{bs})	PFT (mg GAE/g_{bs})
MATERIA PRIMA	0.87	0.98	0.80	-	14.89	97.26	15.85
MATERIA PRIMA	0.87	0.970	0.80	-	15.11	113.45	17.21
MATERIA PRIMA	0.86	0.97	0.80	-	15.19	105.79	17.33
LIOFILIZADO	0.011	0.29	0.75	-	2.48	87.85	9.74
LIOFILIZADO	0.011	0.29	0.74	-	2.38	81.46	10.71
LIOFILIZADO	0.012	0.28	0.71	-	-	92.90	10.63
TUNEL DE SECADO	0.022	0.34	0.76	15.60	0.68	39.64	8.81
TUNEL DE SECADO	0.021	0.29	0.77	14.80	0.81	41.51	10.11
TUNEL DE SECADO	0.026	0.33	0.78	14.04	-	44.03	10.33
CONTROL 70 °C	0.037	0.35	0.74	6.71	0.91	48.80	9.35
CONTROL 70 °C	0.038	0.39	0.73	6.33	0.86	37.84	9.35
CONTROL 70 °C	0.038	0.34	k	5.18	-	46.73	9.39
CONTROL 80 °C	0.037	0.38	0.74	4.47	0.40	40.36	8.97
CONTROL 80 °C	0.034	0.37	0.73	4.12	0.45	36.63	8.83
CONTROL 80 °C	0.034	0.38	0.70	4.36	-	37.24	9.59
CONTROL 95 °C	0.049	0.37	0.84	5.04	0.86	75.98	10.16
CONTROL 95 °C	0.048	0.39	0.84	3.96	0.86	66.05	11.98
CONTROL 95 °C	0.049	0.32	0.79	4.81	-	73.17	10.50
EXP 3	0.043	0.27	0.66	10.42	0.35	44.87	12.05
EXP 3	0.046	0.28	0.65	10.15	0.28	34.35	12.59
EXP 3	0.052	0.31	0.74	11.56	-	40.66	11.92
EXP 4	0.097	0.37	0.90	7.43	0.57	45.73	7.86
EXP 4	0.093	0.36	0.91	7.23	0.57	64.29	8.21
EXP 4	0.118	0.34	0.89	7.04	-	51.37	9.65
EXP 7	0.064	0.35	0.75	10.33	0.66	96.86	10.41
EXP 7	0.071	0.32	0.76	10.81	0.72	96.35	11.04
EXP 7	0.054	0.29	0.75	10.48	-	87.76	12.23

EXP 8	0.097	0.38	0.67	4.66	0.62	55.47	9.67
EXP 8	0.097	0.40	0.83	4.62	0.62	65.24	9.81
EXP 8	0.094	0.39	0.70	4.70	-	66.87	10.44
EXP 9	0.017	0.37	0.74	7.13	0.71	62.14	8.04
EXP 9	0.013	0.38	0.75	7.06	0.64	64.26	8.40
EXP 9	0.014	0.33	0.71	8.44	-	59.62	9.33
EXP 10	0.074	0.23	0.83	7.21	0.69	63.61	10.30
EXP 10	0.102	0.20	0.82	7.11	0.60	58.57	9.94
EXP 10	0.107	0.24	0.79	7.35	-	67.86	9.04
EXP 11	0.055	0.26	0.78	18.43	0.59	73.14	13.00
EXP 11	0.052	0.25	0.83	16.68	0.65	67.21	11.81
EXP 11	0.058	0.29	0.80	15.87	-	56.88	11.48
EXP 12	0.064	0.39	0.82	8.88	0.75	87.61	12.46
EXP 12	0.069	0.33	0.81	8.87	0.70	86.74	12.90
EXP 12	0.067	0.37	0.80	8.83	-	83.58	12.10
EXP 13	0.088	0.35	0.82	7.96	0.48	62.60	9.79
EXP 13	0.099	0.38	0.81	9.46	0.50	58.67	11.32
EXP 13	0.104	0.43	0.79	8.36	-	69.07	9.51
EXP 14	0.070	0.36	0.66	9.10	0.79	62.84	10.27
EXP 14	0.071	0.37	0.66	9.35	0.77	58.44	9.58
EXP 14	0.058	0.38	0.71	7.94	-	70.46	10.10
EXP 15	0.050	0.29	0.65	9.20	0.66	67.25	8.04
EXP 15	0.058	0.27	0.64	8.83	0.71	54.36	9.28
EXP 15	0.058	0.26	0.70	8.87	-	68.69	9.68
EXP 1	0.067	0.33	0.75	9.67	0.85	59.85	6.30
EXP 1	0.066	0.38	0.66	10.36	0.89	56.48	6.64
EXP 1	0.063	0.36	0.74	9.56	-	61.57	6.82
EXP 2	0.051	0.39	0.82	13.93	0.70	58.44	11.32
EXP 2	0.047	0.36	0.75	14.39	0.63	56.99	10.56
EXP 2	0.046	0.38	0.75	13.49	-	63.08	13.13
EXP 5	0.088	0.35	0.75	6.54	0.69	74.74	10.75
EXP 5	0.087	0.38	0.81	6.32	0.69	77.96	9.24
EXP 5	0.102	0.33	0.70	6.70	-	87.37	10.40
EXP 6	0.118	0.39	0.68	8.03	0.92	74.13	11.30
EXP 6	0.109	0.42	0.67	8.87	0.86	76.02	10.93
EXP 6	0.109	0.42	0.68	9.14	-	79.59	11.56

8.2 RESULTADOS DE MUESTRAS EN ALMACEMIENTO ACELERADO

MUESTRA	HUMEDAD (g agua/g muestras)	AW (-)	STT (g Xsst/gbs)	COLOR (-)	TEXTURA UNITARIA (N/mm)	DPPH (µmol Trolox/g_{bs})	PFT (mg GAE/g_{bs})
VR70S0	0.037	0.35	0.74	6.71	0.91	48.80	9.35
VR70S0	0.038	0.39	0.73	6.33	0.86	37.84	9.35
VR70S0	0.038	0.34	0.74	5.18	-	46.73	9.39
VR70S1	0.087	0.34	0.80	13.99	0.43	33.55	9.20
VR70S1	0.086	0.34	0.78	15.51	0.40	42.31	9.44
VR70S1	0.087	0.34	0.78	14.54	-	37.60	8.88
VR70S2	0.075	0.33	0.83	32.39	0.31	42.63	9.91
VR70S2	0.073	0.33	0.85	34.40	0.41	34.86	9.93
VR70S2	0.074	0.33	0.82	34.76	-	51.57	9.64
VR70S3	0.072	0.40	0.71	28.54	0.24	51.51	9.87
VR70S3	0.071	0.42	0.76	30.84	0.23	50.06	10.35
VR70S3	0.072	0.42	0.80	29.33	-	41.99	10.34
VR70S4	0.088	0.42	0.80	38.91	0.63	26.54	7.42
VR70S4	0.088	0.44	0.74	36.71	0.64	30.62	7.59
VR70S4	0.086	0.42	0.69	38.36	-	22.21	7.79
VR80S0	0.037	0.38	0.74	4.47	0.40	40.36	8.97
VR80S0	0.034	0.37	0.73	4.12	0.45	36.63	8.83
VR80S0	0.034	0.38	0.70	4.36	-	37.24	9.59
VR80S1	0.043	0.31	0.85	11.03	0.51	28.54	8.39
VR80S1	0.043	0.31	0.79	11.43	0.42	39.09	8.30
VR80S1	0.044	0.31	0.76	11.23	-	23.55	8.63
VR80S2	0.054	0.43	0.87	22.54	0.20	56.67	10.55
VR80S2	0.051	0.43	0.75	21.49	0.30	47.19	10.39
VR80S2	0.050	0.44	0.78	23.60	-	46.89	9.75
VR80S3	0.092	0.41	0.87	31.82	0.58	36.44	8.01
VR80S3	0.090	0.41	0.76	30.95	0.57	38.11	7.51
VR80S3	0.089	0.40	0.85	33.10	-	24.91	7.52
VR80S4	0.119	0.37	0.88	31.59	0.28	20.98	7.99
VR80S4	0.117	0.36	0.78	33.53	0.24	22.23	7.42
VR80S4	0.118	0.37	0.85	31.38	-	15.56	7.34
VR95S0	0.049	0.37	0.84	5.04	0.86	75.98	10.16
VR95S0	0.048	0.39	0.84	3.96	0.86	66.05	11.98
VR95S0	0.049	0.32	0.79	4.81	-	73.17	10.50
VR95S1	0.059	0.41	0.80	27.77	0.73	21.59	7.97
VR95S1	0.057	0.41	0.82	23.56	0.61	19.30	7.17
VR95S1	0.058	0.43	-	21.32	-	24.06	7.51

VR95S2	0.080	0.39	0.79	28.05	0.46	38.51	7.24
VR95S2	0.075	0.39	0.78	26.82	0.46	38.51	9.26
VR95S2	0.074	0.39	-	29.64	-	32.59	8.87
VR95S3	0.072	0.39	0.71	40.60	0.58	33.99	7.24
VR95S3	0.073	0.39	0.73	39.23	0.50	34.40	9.50
VR95S3	0.073	0.39	-	39.93	-	33.06	9.25
VR95S4	0.093	0.51	0.71	43.05	0.38	25.66	5.84
VR95S4	0.092	0.51	0.69	37.17	0.30	35.94	6.89
VR95S4	0.092	0.51	-	40.39	-	25.15	7.15
EXP6S0	0.118	0.39	0.68	8.03	0.92	74.13	11.30
EXP6S0	0.109	0.42	0.67	8.87	0.86	76.02	10.93
EXP6S0	0.109	0.42	0.68	9.14	-	79.59	11.56
EXP6S1	0.153	0.64	0.70	37.03	0.22	22.45	8.23
EXP6S1	0.152	0.65	0.70	39.46	0.22	22.17	8.65
EXP6S1	0.152	0.65	0.71	40.44	-	16.55	8.38
EXP6S2	0.185	0.69	0.90	35.09	0.35	17.81	6.47
EXP6S2	0.182	0.69	0.91	33.11	0.30	20.73	7.08
EXP6S2	0.184	0.68	0.88	39.39	-	18.98	7.44
EXP6S3	0.197	0.69	0.88	38.17	0.33	12.24	6.24
EXP6S3	0.195	0.71	0.88	41.95	0.56	14.93	7.42
EXP6S3	0.204	0.69	0.87	37.80	-	18.52	6.82
EXP6S4	0.149	0.70	0.76	44.70	0.35	20.33	7.79
EXP6S4	0.150	0.72	0.84	45.98	0.28	22.10	7.80
EXP6S4	0.150	0.72	0.84	42.90	-	25.25	8.13
EXP2S0	0.051	0.39	0.82	13.93	0.70	58.44	11.32
EXP2S0	0.047	0.36	0.75	14.39	0.63	56.99	10.56
EXP2S0	0.046	0.38	0.75	13.49	-	63.08	13.13
EXP2S1	0.086	0.48	0.75	38.02	0.35	62.86	10.71
EXP2S1	0.087	0.47	0.75	31.93	0.34	61.06	10.92
EXP2S1	0.086	0.47	0.78	36.12	-	66.73	10.96
EXP2S2	0.102	0.52	0.77	33.45	0.84	31.78	8.43
EXP2S2	0.100	0.52	0.76	33.35	0.86	27.58	8.19
EXP2S2	0.100	0.50	0.77	34.31	-	30.47	7.97
EXP2S3	0.089	0.66	0.78	36.75	0.25	35.13	9.63
EXP2S3	0.089	0.66	0.81	36.05	0.23	37.46	10.71
EXP2S3	0.090	0.65	0.75	37.40	-	36.68	10.01
EXP2S4	0.119	0.66	0.78	41.28	0.29	38.60	8.22
EXP2S4	0.119	0.66	0.81	40.33	0.55	26.43	8.54
EXP2S4	0.117	0.67	0.76	46.57	-	25.61	8.67
EXP8S0	0.097	0.38	0.67	4.66	0.62	55.47	9.67

EXP8S0	0.097	0.40	0.83	4.62	0.62	65.24	9.81
EXP8S0	0.094	0.39	0.70	4.70	-	66.87	10.44
EXP8S1	0.086	0.62	0.78	34.52	0.27	45.28	8.99
EXP8S1	0.087	0.67	0.79	26.57	0.26	45.80	9.39
EXP8S1	0.089	0.67	0.75	35.97	-	50.77	9.65
EXP8S2	0.088	0.51	0.75	38.41	0.29	34.29	9.57
EXP8S2	0.088	0.50	0.77	38.47	0.30	34.55	10.90
EXP8S2	0.089	0.50	0.73	38.20	-	38.22	9.76
EXP8S3	0.120	0.52	0.84	42.06	0.81	25.09	10.39
EXP8S3	0.121	0.52	0.85	41.45	0.62	17.35	9.05
EXP8S3	0.121	0.51	0.82	41.89	-	18.68	8.48
EXP8S4	0.110	0.51	0.80	46.31	0.69	25.00	8.10
EXP8S4	0.111	0.51	0.83	46.44	0.70	19.68	8.36
EXP8S4	0.110	0.54	0.82	46.08	-	21.80	8.85