



Universidad de Chile

Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas

Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química

**“ESTUDIO DEL EFECTO DE DISTINTOS PRETRATAMIENTOS EN
VACCINIUM CORYMBOSUM DURANTE SECADO POR
CONVECCIÓN, UTILIZANDO VISIÓN POR COMPUTADORA”.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO EN ALIMENTOS

Dario Alejandro Cruces Castro

Luis Puente Díaz

Profesor Patrocinante y Profesor Director

Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química

Ingeniero en Alimentos

Doctor en Tecnología en Alimentos

Santiago – Chile 2022

PROFESOR PATROCINANTE

Luis Puente Díaz

Ingeniero en Alimentos, Doctor en Tecnología en Alimentos
Departamento de Ciencia de los Alimentos y Tecnología Química

AGRADECIMIENTOS:

Me gustaría agradecer a todas las personas que han ayudado durante la realización de este trabajo.

A mis padres, Rubén y Cecilia, por brindarme su apoyo incondicional en el cumplimiento de mis objetivos personales y académicos. Por enseñarme valores como el trabajo duro, la paciencia, responsabilidad e integridad. También son los que me han guiado todos estos años, a pesar de nuestras diferencias.

A mis hermanas, Francisca y Katherine, por el cariño y comprensión que me han entregado, a su peculiar manera.

A mi profesor patrocinante, Luis Puente, por el tiempo, apoyo y paciencia que me ha dedicado. Sin sus consejos y correcciones no hubiera podido llegar a este punto.

Por último, agradecer a todas las personas que conocí en la facultad, quienes me acompañaron a lo largo de mi vida universitaria, enseñándome nuevas formas de ver la vida, permitiéndome expandir mi mente.

ÍNDICE

| Capitulo | | Pág. |
|-----------|---|------|
| | AGRADECIMIENTOS | III |
| | ÍNDICE | IV |
| | ÍNDICE DE TABLAS | VII |
| | ÍNDICE DE FIGURAS | VIII |
| | NOMENCLATURA | X |
| | RESUMEN | XII |
| | ABSTRACT | XIV |
| 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2 | ANTECEDENTES GENERALES | 3 |
| 2.1 | Arándanos | 3 |
| 2.2 | Alimentos funcionales | 8 |
| 2.2.1 | Compuestos antioxidantes | 10 |
| 2.2.2 | Compuestos fenólicos | 12 |
| 2.2.3 | Arándanos y las antocianinas | 14 |
| 2.3 | Secado | 16 |
| 2.3.1 | Tipos de secadores | 17 |
| 2.3.2 | Propiedades del producto a secar | 19 |
| 2.3.2.1 | Contenido de Humedad | 19 |
| 2.3.2.2 | Humedad en equilibrio | 21 |
| 2.3.2.3 | Actividad de agua | 21 |
| 2.3.2.4 | Isotermas de sorción | 22 |
| 2.3.2.5 | Cinética de Secado | 23 |
| 2.3.2.5.1 | Curvas de Secado | 23 |
| 2.3.2.5.2 | Curva de velocidad de secado | 25 |
| 2.4 | Modelado Matemático para secado | 25 |
| 2.5 | Difusividad efectiva | 28 |
| 2.6 | Energía de activación | 29 |
| 2.7 | Correlación de coeficientes y análisis de error | 30 |
| 2.8 | Propiedades físicas en los alimentos | 31 |
| 2.8.1 | Volumen | 32 |
| 2.8.1.1 | Desplazamiento de solidos | 33 |
| 2.8.1.2 | Encogimiento durante secado | 33 |
| 2.8.2 | Color | 34 |
| 2.8.2.1 | Modelo de color | 35 |

| | | |
|---------|---|----|
| 2.9 | Visión por computadora | 36 |
| 2.9.1 | Medición de color | 37 |
| 2.9.1.1 | Sistema de iluminación | 38 |
| 2.9.1.2 | Cámara digital | 38 |
| 2.9.1.3 | Análisis de color | 39 |
| 2.10 | Pretratamientos | 40 |
| 3 | HIPOTESIS | 43 |
| 4 | OBJETIVO | 44 |
| 4.1 | Objetivo general | 44 |
| 4.2 | Objetivo específico | 44 |
| 5 | MATERIALES Y METODOS | 45 |
| 5.1 | Materiales y equipo | 45 |
| 5.1.1 | Materia prima | 45 |
| 5.1.2 | Semillas de amapola | 45 |
| 5.1.3 | Balanza | 45 |
| 5.1.4 | Equipo de secado convectivo | 45 |
| 5.1.5 | Equipo de secado al vacío | 46 |
| 5.1.6 | Equipo de ultrasonido | 46 |
| 5.1.7 | Sistema de visión por computadora (CVS) | 46 |
| 5.2 | Métodos utilizados | 48 |
| 5.2.1 | Procedimientos de secado | 48 |
| 5.2.2 | Determinación de cinética de secado | 49 |
| 5.2.3 | Determinación de humedad inicial | 49 |
| 5.2.4 | Caracterización física de la muestra | 49 |
| 5.2.4.1 | Determinación de volumen | 49 |
| 5.2.4.2 | Determinación de color | 50 |
| 5.2.5 | Análisis estadístico | 51 |
| 6 | RESULTADOS Y DISCUSION | 52 |
| 6.1 | Contenido de humedad inicial | 52 |
| 6.2 | Efecto de la temperatura sobre la cinética de secado | 52 |
| 6.3 | Efectos de los pretratamientos sobre la cinética de secado | 54 |
| 6.4 | Modelamiento de la cinética de secado | 55 |
| 6.5 | Determinación de difusividad efectiva y energía de activación | 60 |
| 6.6 | Caracterización física de la muestra | 63 |
| 6.6.1 | Variación de volumen | 64 |
| 6.6.2 | Variación de color | 67 |
| 7 | CONCLUSION | 72 |

| | | |
|---|--------------|----|
| 8 | BIBLIOGRAFIA | 73 |
| 9 | ANEXO | 80 |

INDICE DE TABLAS

| Tabla | | Pág. |
|-------|---|------|
| 1 | Composición del arándano por cada 100 g comestibles | 7 |
| 2 | Principales sistemas de defensa antioxidante del organismo | 11 |
| 3 | Contenido total de antocianos en distintas frutas | 15 |
| 4 | Ventajas y desventajas del secado de alimentos | 17 |
| 5 | Características de una curva de secado | 24 |
| 6 | Modelos matemáticos empíricos para secado | 27 |
| 7 | Estadísticos matemáticos | 31 |
| 8 | Parámetros cinéticos y empíricos de los modelos seleccionados a 50°C | 55 |
| 9 | Parámetros cinéticos y empíricos de los modelos seleccionados a 60°C | 56 |
| 10 | Parámetros cinéticos y empíricos de los modelos seleccionados a 70°C | 56 |
| 11 | Pruebas estadísticas para los modelos de secado a 50°C | 58 |
| 12 | Pruebas estadísticas para los modelos de secado a 60°C | 58 |
| 13 | Pruebas estadísticas para los modelos de secado a 70°C | 59 |
| 14 | Determinación de difusividad efectiva y energía de activación | 60 |
| 15 | Encogimiento en arándanos tratados con distintos pretratamientos | 66 |
| 16 | Diferencia de componentes cromáticos (L^* , a^* y b^*) y diferencia global de color (ΔE) en arándano a distintas temperaturas y pretratamientos | 68 |

INDICE DE FIGURAS

| Figura | | Pág. |
|--------|---|------|
| 1 | <i>Vaccinium Corymbosum</i> | 3 |
| 2 | Escala de color de piel de diferentes estados de desarrollo de arándano variedad O'Neal | 4 |
| 3 | Arándano Highbush | 5 |
| 4 | Arándano Lowbush | 5 |
| 5 | Arándano Rabbiteye | 6 |
| 6 | Ejemplos de estructuras de compuestos fenólicos | 12 |
| 7 | Clasificación de compuestos fenólicos | 13 |
| 8 | Estructura general y sustituyentes de antocianinas | 16 |
| 9 | Configuración típica de un secador de bandeja | 19 |
| 10 | Histéresis en Isotermas | 22 |
| 11 | Curva de secado | 23 |
| 12 | Curva de velocidad de Secado | 25 |
| 13 | Configuración común para un sistema de visión por computadora | 37 |
| 14 | Efectos en la estructura del arándano (<i>V. Corymbosum</i>) al aplicar ultrasonido y escaldado | 42 |
| 15 | Sistema de captura de imagen | 47 |
| 16 | Esquema del sistema de captura de imagen (vista aérea) | 47 |
| 17 | Esquema de Sistema de Visión por Computadora | 47 |
| 18 | Procesamiento de imagen digital para análisis de color | 50 |
| 19 | Valores color de arándano mediante Histogram Window | 51 |
| 20 | Comparación de curvas de secado de <i>Vaccinium Corymbosum</i> a 50, 60 y 70°C | 52 |
| 21 | Comparación de curva de velocidad de secado de <i>Vaccinium Corymbosum</i> a 50, 60 y 70°C | 53 |
| 22 | Efecto de pretratamientos en curva de secado de <i>Vaccinium Corymbosum</i> a 50, 60 y 70°C | 54 |
| 23 | Comparación entre tasa de pérdida de humedad (MR) experimental y predicha a distintas temperaturas y pretratamientos para el modelo de Page | 60 |
| 24 | Relación de tipo Arrhenius entre la difusividad efectiva y la temperatura de secado | 62 |
| 25 | Cambios físicos sufridos en el arándano durante secado a 50°C | 63 |
| 26 | Encogimiento de arándano a 50°C | 64 |
| 27 | Encogimiento de arándano a 60°C | 65 |

| | | |
|----|---|----|
| 28 | Encogimiento de arándano a 70°C | 65 |
| 29 | Color en arándanos a distintas temperaturas y pretratamientos | 68 |
| 30 | Diferencia global de color (ΔE) en arándano a 50°C | 69 |
| 31 | Diferencia global de color (ΔE) en arándano a 60°C | 70 |
| 32 | Diferencia global de color (ΔE) en arándano a 70°C | 70 |

NOMENCLATURA

MR Tasa de pérdida de humedad, Adimensional

X_{bs} Humedad base seca, Kg humedad/ Kg material seco

X_{bh} Humedad base humedad, Kg humedad/ Kg material humedo

m Masa, Kg

-dx/dt Velocidad de secado

k_i Parámetros cinéticos de secado (i=1,2,3 y 4), min^{-1}

n, a y C Parámetros empíricos de secado, adimensional

D_{ef} Difusividad efectiva, m^2/s

E_a Energía de activación, kJ/mol

R Constante universal de los gases, kJ/mol °K

X^2 Chi cuadrado

SSE Suma de errores al cuadrado

RMSE Raíz cuadrada de la suma de los errores al cuadrado

N Numero de observaciones

Z Numero de constantes

S Encogimiento, adimensional

V_f Volumen final, cm^3

V_0 Volumen inicial, cm^3

L^* Coordenada de color CIELAB (luminosidad)

a^* Coordenada de color CIELAB (verde-rojo)

b^* Coordenada de color CIELAB (azul-amarillo)

ΔE^* Diferencia global de color

RESUMEN

“ESTUDIO DEL EFECTO DE DISTINTOS PRETRATAMIENTOS EN *VACCINIUM CORYMBOSUM* DURANTE SECADO POR CONVECCIÓN, UTILIZANDO VISIÓN POR COMPUTADORA”

Los arándanos (*Vaccinium Corymbosum*) son frutos de color azul muy populares, los cuales son ricos en compuestos fenólicos principalmente las antocianinas. El consumo de este alimento está relacionado con diversos beneficios para la salud humana como los son: efectos anticancerígenos, antioxidantes, antiinflamatorios, antiobesidad y antidiabéticos. Lo anterior permite considerar a esta baya como un alimento funcional, y pensar en su uso como ingrediente en el diseño de otros productos.

El presente trabajo tuvo como objetivo principal el estudio del efecto de pretratamientos en el arándano durante un proceso de secado, mediante un análisis y procesamiento de imágenes por visión por computadora. Para esto, se prepararon muestras con pretratamientos de escaldado por vapor saturado y ultrasonido a 40 kHz, las que fueron caracterizadas en términos de volumen y color durante un proceso de secado convectivo a 50, 60 y 70°C. Las curvas de secado se caracterizaron mediante los modelos de Newton, Page, Henderson-Pabis y Logarítmico, evaluando el mejor ajuste a través de los estadísticos matemáticos R^2 , SSE, RMSE y X^2 . Para determinar la difusividad efectiva, se utilizó la solución de Crank a la segunda ley de Fick. La energía de activación fue obtenida mediante la relación de Arrhenius. El volumen se midió usando desplazamiento de sólidos y el color fue analizado mediante análisis de imágenes digitales.

Se obtuvieron curvas de secado de carácter exponencial con un único periodo de velocidad decreciente. A medida que incremento la temperatura se presentaron mayores velocidades de secado, señalando diferencias significativas entre las curvas de 50 y 60°C. los pretratamientos generaron aumentos en la velocidad de secado, pero no de forma significativa. El modelo de Page presento el mejor ajuste

para las curvas de secado. La difusividad del fruto estuvo en el rango de $9,72 \pm 2,45 \cdot 10^{-10}$ y $5,32 \pm 0,78 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Los valores de energía de activación calculados fueron $77,0 \pm 7,8$; $76,7 \pm 0,7$ y $78,8 \pm 4,7$ kJ/mol para las muestras control, ultrasonido y escaldado. El encogimiento del fruto presento un comportamiento lineal, advirtiendole que los pretratamientos disminuyeron ligeramente su contracción. En cuanto a color, los arándanos se presentaron más oscuros y menos azules respecto al fruto fresco, pero no de forma significativa presentando diferencia global de color en rangos de $1,11 \pm 0,37$ y $2,28 \pm 0,24$. En general, durante este trabajo no se observaron diferencias suficientes para afirmar que uno de los pretratamientos fue mejor que el otro. Las evaluaciones denotaron que la temperatura presento mayor influencia en el fruto que los tratamientos. Aumentar la intensidad de los pretratamientos podría generar mejores resultados.

Palabras claves: Arándanos, pretratamientos, temperatura, volumen y color.

ABSTRACT

“STUDY OF EFFECT OF DIFFERENT PRETREATMENTS ON *VACCINIUM CORYMBOSUM* DURING CONVECTION DRYING, USING COMPUTER VISION”

Blueberries (*Vaccinium Corymbosum*) are very popular fruits, which are rich in phenolic compounds, mainly anthocyanins. The consumption of this food is related to various benefits for human health, such as: anticancer, antioxidant, anti-inflammatory, antiobesity and antidiabetic effects. This allows us to consider this berry as a functional food, and to think about its use as an ingredient in the design of other products.

The present work had as main objective the study of the effect of pretreatments in the blueberry during a drying process, through an analysis and processing of images by computer vision. For this, samples were prepared with pretreatments of scalding by saturated steam and ultrasound at 40 kHz, which were characterized in terms of volume and color during convective drying at 50, 60 and 70°C. The drying curves were characterized using the Newton, Page, Henderson-Pabis and Logarithmic models, evaluating the best fit through mathematical statistics R^2 , SSE, RMSE y X^2 . Effective diffusivity was determined by Crank's solution to Fick's second law. Activation energy was obtained using Arrhenius relation. Volume was measured using solid displacement and color was analyzed by digital image analysis.

Exponential drying curves were obtained with a single period of decreasing speed. As temperature increased, higher drying speeds were presented, indicating significant differences between curves of 50 and 60°C. Pretreatments generated increases in drying rate, but not significantly. Page model presented best fit for drying curves. Diffusivity of fruit was in the range of $9,72 \pm 2,45 \cdot 10^{-10}$ and $5,32 \pm 0,78 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Activation energy values were $77,0 \pm 7,8$; $76,7 \pm 0,7$ and $78,8 \pm 4,7$ kJ/mol for control, ultrasound and scalding samples. Shrinkage of fruit presented linear behavior, noting that pretreatments slightly decreased contraction. In terms of color, blueberries were darker and less blue compared to fresh fruit, but not significantly, presenting global color difference in ranges of $1,11 \pm 0,37$ and $2,28 \pm 0,24$. In general,

during this study, there were not enough differences to affirm that one of the pretreatments was better than the other. Evaluations denoted that temperature had a greater influence on fruit than treatments. Increasing intensity of pretreatments could lead to better results.

Keywords: Blueberries, pretreatments, temperature, volume and color.

1. INTRODUCCIÓN

El secado es una tecnología clave para conservar las frutas frescas. Sin embargo, las frutas son materiales muy complejos y durante el secado se producen múltiples procesos físicos y bioquímicos. (Defraeye & Radu, 2018)

Para el desarrollo del siguiente trabajo, se escogió como objeto de estudio el arándano (*Vaccinium Corymbosum*) debido a su forma, pequeño tamaño e interés por sus beneficios para la salud.

El secado por aire convectivo es la tecnología de secado más común utilizada en el procesamiento de arándanos. Sin embargo, el secado por aire puede causar una degradación térmica indeseable de la calidad del producto, en particular la textura, el color y el valor nutricional, lo que podría reducir el valor de mercado de los arándanos secos. (Chen & Martynenko, 2013)

El comportamiento de los arándanos durante un proceso de secado por convección ha sido estudiado ocasiones anteriores (Vega *et al.*, 2009; Kowalski *et al.*, 2016; López *et al.*, 2010; Grabowski *et al.*, 2007). El mayor desafío que se detectó durante dicho proceso es la baja difusividad de la fruta fresca, producto de su cascara cerosa casi impermeable que dificulta la difusión del agua desde el interior a los alrededores de la fruta. Para aumentar dicha difusividad, algunos autores (Chen & Martynenko, 2013; Vega *et al.*, 2011) sugieren técnicas de pretratamiento como blanqueo, ultrasonido, deshidratación osmótica, entre otros.

El color es uno de los parámetros de calidad más importantes de los productos secos en lo que respecta a la percepción del consumidor. (Udomkum *et al.*, 2017). En frutas, el color es un indicador visible de algunos pigmentos, como antocianinas, carotenoides, clorofilas y betalaínas. El color de la fruta puede cambiar significativamente durante el secado debido a reacciones químicas y biológicas, que dependen del tiempo y la temperatura. (Chen & Martynenko, 2013)

Una de las escalas más populares para la medición de color en los alimentos es el espacio de color CIELAB. Este sistema cartesiano de 3 ejes (L^* , a^* y b^*) transforma

la reflexión o transmisión del espectro de un objeto en un espacio de color tridimensional.

Recientemente, la aplicación de sistemas de visión por computadora (CVS) es una de las técnicas más prometedoras que ha mostrado potencial en el área de evaluación y cuantificación de superficies de colores no uniformes en producciones de frutas y verduras. (Udomkum *et al.*, 2017).

La visión por computadora (CVS) se clasifica como una técnica de muestreo no destructiva, que basa su funcionamiento en el procesamiento y análisis de imágenes con el fin de extraer información cuantitativa de imágenes digitales. CVS se compone básicamente de un iluminante estándar, una cámara digital para la adquisición de imágenes, hardware y software de computadora para procesar la imagen. (Udomkum *et al.*, 2017).

Un atributo clave que permite el procesamiento de imágenes adecuado para mediciones cualitativas durante el procesamiento de alimentos es la relación entre los atributos de calidad del producto y la apariencia de los alimentos, incluida la estructura física, el color y la textura visual. (Aghbashlo *et al.*, 2014).

La visión por computadora (CVS) se presenta como una forma conveniente y precisa en la medición de parámetros de calidad en frutas, como el color.

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. Arándanos

El arándano es un arbusto nativo de Norteamérica, el cual pertenece a la familia *Ericaceae* y al género *Vaccinium*. Del cual hay aproximadamente 400 especies, destacando los whortleberries, deerberries, sparkleberries, cranberries y blueberries. Siendo estos últimos los que han alcanzado mayor importancia comercial en el sector frutícola. (INDAP, 2021)



Fig. 1 *Vaccinium Corymbosum*.

El fruto del arándano como se observa en la figura 1, es una baya casi esférica que, dependiendo de la especie y cultivo, puede variar en tamaño de 0,7 a 2,5 cm de diámetro ecuatorial y en color desde azul claro hasta negro. (INDAP, 2021) La piel del fruto está cubierta por una pared celular epidérmica compuesta de gruesas capas lipídicas continuas (capa cutinizada, cutícula y ceras epicuticulares (pruina)) depositadas en su región más externa. (Jeffree *et al.*, 1976) Está cubierta cerosa reduce la pérdida de agua y solutos apoplásticos; forma una barrera mecánica contra la penetración de hifas fúngicas; protege el tejido de daño mecánico; refleja y atenúa la radiación; actúa como compartimiento de acumulación de compuestos lipofílicos; actúa como medio de señales para plantas y reduce la retención de agua en la superficie de las plantas. (Kerstiens, 1996)

Los arándanos tienen un sabor particular, difícilmente comparable: dulce y ligeramente ácido a la vez. Son de bajo contenido calórico, pobre en grasas y sodio, rico en fibras y minerales, alta concentración de vitamina C y con propiedades

antioxidantes, destacándose especialmente el contenido de antocianinas. (Omar, 2013)

Los arándanos son de color de piel verde en las primeras etapas de su desarrollo. (Figura 2) A medida que avanza la madurez fisiológica, y como resultado de los procesos bioquímicos naturales, se manifiestan las principales características organolépticas que los hacen aptos para el consumo. Una de ellas es la síntesis de pigmentos antociánicos a través de la cual el color de piel toma tonalidades desde el verde rosa al rojo bordó, para finalmente virar al azul. (Feippe *et al.*, 2012). A medida que el color cambia, se produce un aumento en el contenido de sólidos solubles (azúcares), y una disminución de la acidez. También se observa un progresivo ablandamiento de la pulpa. (Omar, 2013)



Fig. 2 Escala de color de piel de diferentes estados de desarrollo de arándano variedad O'Neal. (Feippe *et al.*, 2012)

Las distintas especies y grupos de variedades de arándanos se clasifican de acuerdo a sus hábitos de crecimiento y requerimientos de frío. Esta clasificación puede dividirse generalmente en 5 tipos: arándano “alto” (highbush), arándano “gigante” (rabbiteye), arándano “bajo” (lowbush), arándano “siempre verde” (Evergreen huckleberry) y arándano “azul montano” (Mountain blueberry). Las 3 primeras subfamilias se utilizan en la actualidad para producción de fruta, dejando las dos restantes con fines ornamentales.

El arándano highbush (*Vaccinium Corymbosum*) se considera la variedad más popular a nivel mundial. Este arbusto presentado en la figura 3, se encuentra adaptado a climas templados y puede alcanzar 1,5 metros de altura. Los frutos producidos por esta variedad son de tamaño medio, con buenas propiedades en color, sabor y firmeza. En Chile, se cultivan las subvariedades “intermediate highbush” en la zona centro del país y “southern highbush” en la zona sur.



Fig. 3 Arándano Highbush.

La variedad de arándano lowbush (*Vaccinium. Angustifolium*) se caracteriza por ser un arbusto pequeño (30 a 50 cm) y producir frutos pequeños y de buen sabor tal y como se observa en la figura 4. Este tipo de arbusto se distribuye en regiones muy frías, llegando a tolerar temperaturas de hasta -35°C.



Fig. 4 Arándano Lowbush.

El arándano rabbiteye (*Vaccinium Ashei*) presenta un arbusto robusto que puede alcanzar alturas de 5 a 6 metros como se aprecia en la figura 5. Esta variedad se caracteriza por ser la más resistente de todas soportando mayor pH de suelo, superiores temperaturas y tolerar condiciones de sequía. Su fruto es más pequeño y de menor calidad respecto al resto de variedades.



Fig. 5 Arándano rabbiteye.

Desde un punto de vista nutricional, los arándanos son ricos en agua y azúcares, particularmente glucosa y fructosa, aunque se pueden encontrar otros azúcares como galactosa y ramnosa, frecuentemente como restos de azúcar asociados con compuestos fenólicos. Estas bayas también poseen una cantidad relativamente alta de ácidos orgánicos (por ejemplo, ácidos cítrico y ascórbico), minerales (por ejemplo, fósforo, potasio y magnesio) y fibra, particularmente pectinas. (Silva *et al.*, 2020). Tal y como se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1. Composición del arándano por cada 100 g comestibles. Fuente: USDA
(2019)

| Nutriente | Cantidad |
|------------------------|-----------------|
| Energía (kcal) | 57 |
| Agua (g) | 84,2 |
| Proteína (g) | 0,74 |
| Lípidos (g) | 0,33 |
| Cenizas (g) | 0,24 |
| Carbohidratos (g) | 14,5 |
| Fibra dietética (g) | 2,4 |
| Azúcar total (g) | 9,96 |
| Glucosa (g) | 4,88 |
| Fructosa (g) | 4,97 |
| Almidón (g) | 0,03 |
| Calcio (mg) | 6 |
| Hierro (mg) | 0,28 |
| Magnesio (mg) | 6 |
| Fosforo (mg) | 12 |
| Potasio (mg) | 77 |
| Sodio (mg) | 1 |
| Ac. Ascórbico (mg) | 9,7 |
| Tiamina (mg) | 0,037 |
| Riboflavina (mg) | 0,041 |
| Niacina (mg) | 0,418 |
| Acido Pantoténico (mg) | 0,124 |
| Vitamina B-6 (mg) | 0,052 |
| Vitamina A (IU) | 54 |
| Vitamina E (mg) | 0,57 |

A nivel mundial, el cultivo de arándanos se realiza en al menos 30 países, destacando como principales proveedores Perú, Chile, México, EEUU, Sudáfrica, Polonia y Canadá. Según menciona el Servicio Agrícola Extranjero del departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA-FAS, 2021), la producción mundial de arándanos se duplicó entre los años 2010-2019.

En el caso de Chile, de acuerdo con ODEPA en el boletín de la fruta de enero-noviembre de 2021. Los arándanos frescos registraron un volumen de exportación de 17.505 toneladas, equivalentes a USD 99 millones FOB.

A futuro, se espera un crecimiento constante de la demanda mundial del arándano impulsada principalmente por Europa. Para los años 2025-2026, las exportaciones alcanzarán las 900.000 toneladas. Del cual, 70% provendría de Perú, Chile, Canadá, México y España. (AGROCELER, 2021)

2.2. Alimentos funcionales

Hoy en día es creciente la demanda de productos alimenticios que además de proporcionar nutrientes para la dieta, ofrezcan beneficios para la salud.

Autores como Bello (2003) clasifican a los alimentos según dos propiedades básicas: 1-nutricionales: cuando hacen referencia a la capacidad de contribuir al aporte de sustancias con propiedad de nutrientes. 2- funcionales: cuando determinan el comportamiento del alimento dentro de los sistemas integrados por diversas especies químicas, independientemente del valor nutritivo. Dentro de este último grupo se pueden distinguir tres aspectos: sensoriales, tecnológicos y saludables.

Puede considerarse entonces como alimento funcional, un producto que dentro de sus características se encuentre el poseer propiedades beneficiosas para la salud y/o reductores de riesgo de enfermedad, y que pueda ser consumido en una dieta normal. Estas características pueden ser de forma natural, por medio de una modificación (adición o eliminación de algún compuesto), alteración de la biodisponibilidad de sus componentes o mediante alimentos obtenidos de la

combinación de estas posibilidades. Todas las menciones anteriores tienen en común el mantener el carácter de alimento, a diferencia de los productos nutraceúticos.

Entre las aplicaciones de los alimentos funciones se mencionan:

- **Crecimiento, desarrollo y diferenciación:** Alimentos enriquecidos en hierro, yodo, calcio, ácido fólico, ácidos grasos, vitaminas, etc. Favorecen las etapas de gestación, desarrollo fetal y desarrollo del lactante y/o niño
- **Regulación del metabolismo:** Con el fin de mantener un peso adecuado, se desarrollan alimentos que mejoren el control glucémico (productos bajos en azúcares simples o con adición de fibra), control de las tasas de colesterol y triglicéridos plasmáticos asociados a riesgo cardiovascular (alimentos bajos en grasas o enriquecidos en omega-3) o productos adecuados al rendimiento de actividad física (específicos para deportistas como barras energéticas)
- **Defensa contra el estrés oxidativo:** Los compuestos antioxidantes presentes en alimentos (vitaminas C y E, carotenoides, polifenoles, entre otros) funcionan como una barrera frente a efecto nocivo de los radicales libres sobre el ADN, proteínas y los lípidos del cuerpo. El consumo de estos alimentos reduce el riesgo de sufrir enfermedades cardiovasculares, degenerativas e incluso del cáncer.
- **Prevención de enfermedades cardiovasculares:** Algunos alimentos funcionales pueden ejercer un rol sobre factores predisponentes a la hipertensión, aumento de coagulación, bajas concentraciones de vitamina K, etc. Los lípidos sanguíneos pueden modificarse en presencia de ciertos ácidos grasos (omega-3 y omega-6), de fibra y antioxidantes como los flavonoides (inhiben oxidación de lipoproteínas de baja densidad (LDL) del plasma.
- **Tracto gastrointestinal:** Un adecuado equilibrio en la flora micro intestinal se relaciona como un factor importante para la salud. Para mantener dicho equilibrio, el uso de prebióticos (fibra soluble), probióticos (alimentos fermentados como el yogurt) y simbióticos (mezcla de pre y probióticos)

juegan un rol importante en ese equilibrio y selección de flora predominante del intestino.

- **Funciones psicológicas, conductuales y de aprendizaje:** Es reconocida las relaciones entre los nutrientes y las funciones cerebrales. Alimentos ricos en fibra ayudan a regular la ansiedad, alimentos ricos en proteínas poseen propiedades reguladoras de sueño, equilibrantes de estrés y emocional, alimentos ricos en carbohidratos mejoran la actividad cognitiva en situaciones de alto gasto energético, entre otros.

2.2.1. Compuestos antioxidantes

Se entiende al estrés oxidativo como el desequilibrio entre especies oxidantes (radicales libres) y el sistema de defensa de organismo (antioxidantes)

Los radicales libres componen a especies químicas con uno o más electrones desapareados, describiéndolos como compuestos altamente inestables, que requieren reaccionar mediante oxido-reducción con moléculas adyacentes para estabilizarse.

Se denomina antioxidante a cualquier sustancia que, estando presente a una concentración más baja comparada con la de un sustrato oxidable, es capaz de retrasar o prevenir la oxidación de dicho sustrato. (Omar, 2013) Los principales sistemas de defensa contra el estrés oxidativo se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Principales sistemas de defensa antioxidante del organismo. (Omar, 2013)

| Antioxidantes de la dieta | |
|----------------------------------|--|
| Ácido Ascórbico | Reacción con superóxido, oxígeno singlete y radical peroxilo. Regeneración de tocoferoles |
| Tocoferoles | Protección de membranas lipídicas. Bloqueo de la cadena de reacciones de peroxidación |
| Carotenoides | Desactivación del oxígeno singlete. Bloqueo de la cadena de reacciones de peroxidación |
| Compuestos fenólicos | Captación de radicales libres y actividad quelante de metales |

La teoría del envejecimiento por radicales libres (Harman, 1956), considera que los radicales libres producen al azar un daño acumulativo en las macromoléculas biológicas, que conduce a una disminución de las funciones vitales y al envejecimiento. Entonces a medida que avanza la edad, se acumulan los productos de la oxidación de proteínas, lípidos y ácidos nucleicos en el organismo.

La dieta humana debería implementar antioxidantes para reforzar las defensas del organismo. Se ha mostrado que dietas ricas en alimentos vegetales contribuyen a la disminución de la incidencia y tasas de mortalidad de enfermedades degenerativas causadas por el estrés oxidativo (Tibble, 1998). Entidades como la Organización Mundial de la salud aconsejan que, para tener una alimentación sana, se deberían ingerir al menos 400 g (5 porciones) de frutas y/o verduras al día a fin de cumplir una ingesta adecuada de antioxidantes. (OMS, 2018)

2.2.2. Compuestos fenólicos

Frutas rojas y bayas son ricas en compuestos fenólicos. Los compuestos fenólicos se caracterizan por presentar un anillo benceno hidroxilado como elemento común en su estructura, el cual puede incluir grupos funcionales como ésteres, metil ésteres, glicósidos, entre otros. Como se puede observar en la figura 6.

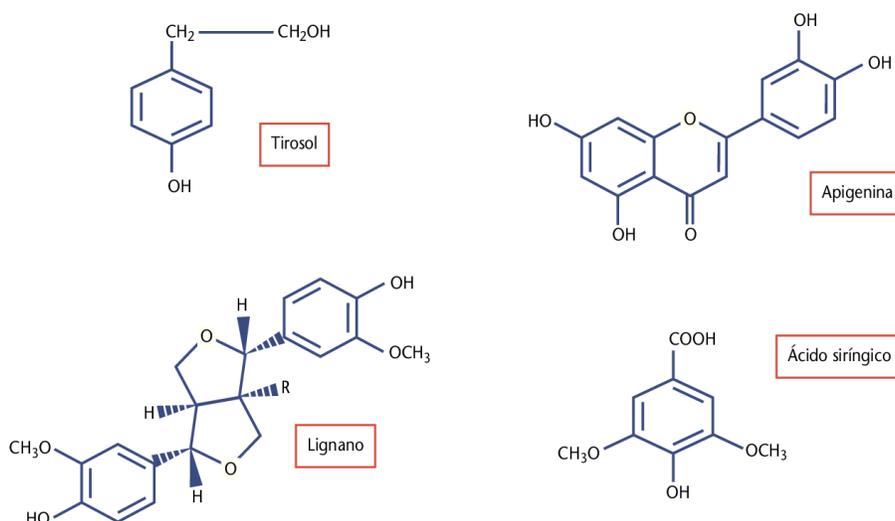


Fig. 6 Ejemplos de estructuras de compuestos fenólicos.

Los compuestos fenólicos pueden ser clasificados de diversas maneras debido a su variedad estructural. Esta organización puede ser por el número de grupos fenoles, número y tipo de grupo funcional unido al anillo aromático, elemento estructural que une anillos bencénicos, etc. En la figura 7 se presenta la clasificación propuesta por Mark *et al.* (2019)

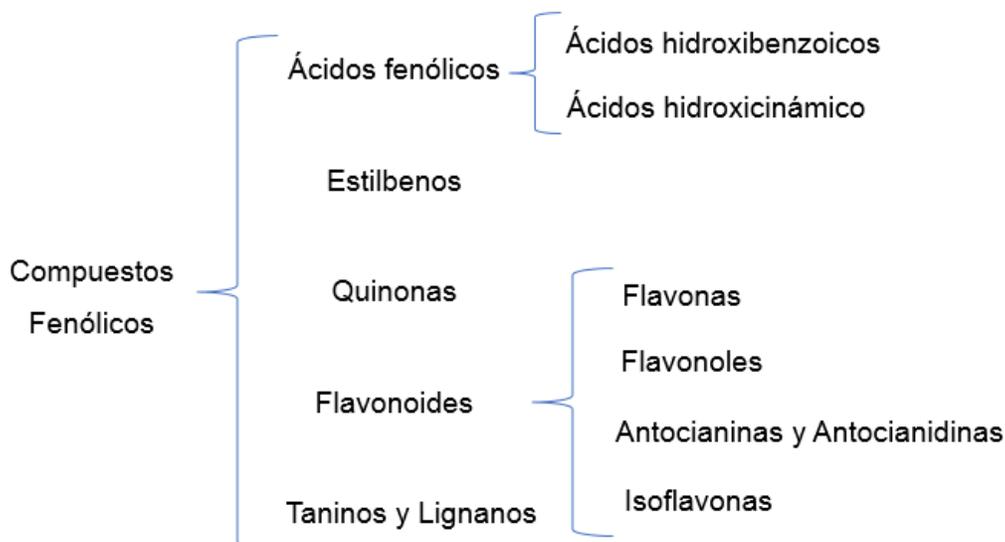


Fig. 7 Clasificación de compuestos fenólicos

- **Ácidos fenólicos:** Poseen un anillo aromático con al menos un grupo hidroxilo y ácido carboxílico como grupo funcional. Se pueden dividir en los derivados del ácido benzoico y los del ácido cinámico.
- **Estilbenos:** La estructura química de esta familia está constituida por un grupo de difenil etileno que puede encontrarse en 2 formas isómeras: trans-1,2- difenil etileno y el cis-1,2- difenil etileno, siendo la última la menos estable.
- **Quinonas:** Corresponde a una dicetona cíclica no saturada que mediante una reducción puede convertirse en una hidroquinona.
- **Flavonoides:** Su estructura corresponde a 15 carbonos ordenados en 2 anillos aromáticos unidos por un puente de tres carbonos. Se pueden subclasificar en función del grado de oxidación del puente de 3 carbonos en antocianinas, flavonoles, flavonas e isoflavonas.
- **Taninos y lignanos:** Corresponden a compuestos fenólicos poliméricos unidos a proteínas.

De esta manera, los compuestos fenólicos comprenden una gran variedad de moléculas, que van desde las más simples como como los ácidos benzoicos hasta los más complejos como las ligninas. (Omar, 2013)

La actividad antioxidante de los compuestos fenólicos radica en su capacidad para donar un hidrógeno que pone fin a la producción de radicales libres, a fin de detener la reacción en cadena que conduciría a la destrucción celular durante la oxidación. (Mark *et al.*, 2019) En adición, estas moléculas poseen una estructura química ideal para captar iones metálicos (hierro y cobre principalmente), inhibiendo la formación de radicales libres a través de las reacciones de Fenton. En los últimos años, se descubrió que las dietas enriquecidas con fenoles pueden ayudar a prevenir una amplia gama de enfermedades, como el cáncer, la diabetes, las enfermedades cardíacas, las enfermedades neurodegenerativas y cardiovasculares y el envejecimiento. (Mark *et al.*, 2019)

En alimentos, los compuestos fenólicos se suelen presentar conjugados con azúcares como la glucosa, arabinosa, ramnosa, entre otros. También se los puede observar unidos a ácidos carboxílicos, ácidos orgánicos, aminas y lípidos.

2.2.3. Arándanos y las antocianinas

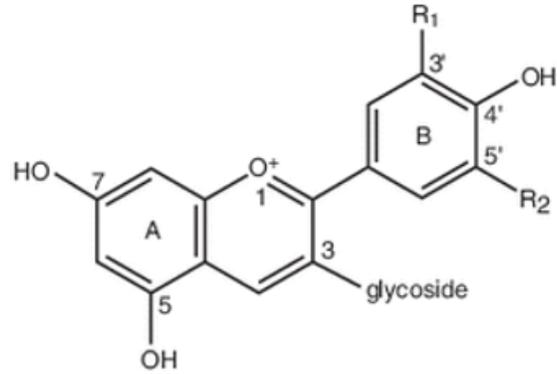
Como se mencionó anteriormente, las frutas rojas y las bayas se caracterizan por su elevado contenido de compuestos fenólicos. Los arándanos son ampliamente reconocidos por poseer un alto contenido y variedad de compuestos fenólicos (particularmente antocianinas) (Silva *et al.*, 2020), tal y como se observa en la tabla 3. Según Das (2021), la bioactividad de esta fruta incluye posibles efectos anticancerígenos, antioxidantes, antiinflamatoria, antiobesidad y antidiabética.

Tabla 3. Contenido total de antocianinas en distintas frutas. (Zanotti *et al.*, 2015)

| Fruta | Contenido (mg/Kg) |
|----------------|--------------------------|
| Mora | 4000 |
| Grosella negra | 4000 |
| Arándano | 5000 |
| Fresa | 750 |
| Uvas rojas | 7500 |
| Granada | 250 |

Las antocianinas son glucósidos de antocianidinas, pertenecientes a la familia de los flavonoides, compuestos por dos anillos aromáticos A y B unidos por una cadena de 3 C. Modificaciones en los grupos funcionales del anillo aromático B, tiene como resultado la existencia de 6 tipos de antocianinas, tal como se puede observar en la figura 8. Incrementos en la hidroxilación producen un desplazamiento a las tonalidades más azules, mientras que las metoxilaciones tienden al rojo

En vegetales frescos, las antocianinas suelen encontrarse unidas a azúcares dando lugar a los antocianos, que son los compuestos responsables de los colores azul, púrpura, rojo y matices intermedios de coloración en frutas como arándanos, uvas, cerezas, frutillas, entre otros.



| Aglicona | Substitución | | Espectro visible λ máx (nm) |
|---------------|--------------|------|--|
| | R1 | R2 | |
| Pelargonidina | H | H | 494 (naranja) |
| Cianidina | OH | H | 506 (naranja-rojo) |
| Delfinidina | OH | OH | 508 (azul-rojo) |
| Peonidina | OCH3 | H | 506 (naranja-rojo) |
| Petunidina | OCH3 | OH | 508 (azul-rojo) |
| Malvidina | OCH3 | OCH3 | 510 (azul-rojo) |

Fig. 8 Estructura general y sustituyentes de antocianinas. (Durst y Wrolstad, 2001)

Los arándanos además de su valor nutricional, pueden considerarse un alimento funcional por sus propiedades antioxidantes. Un procesamiento adecuado permitiría retener de forma significativa sus antocianinas, permitiendo utilizar esta fruta como un alimento funcional o ingrediente en el diseño de alimentos funcionales, como lo serían las pasas de arándanos.

2.3. Secado

El secado es uno de los métodos más antiguos utilizados en la conservación de alimentos. Esta operación consiste en eliminar la mayor parte del agua contenida de un determinado alimento para conseguir una actividad de agua tan baja que impida la multiplicación microbiana y la actividad enzimática. (Fructuoso, 2018). El secado es un complejo proceso que involucra transferencia de calor y masa, lo que

produce cambios significativos en la composición química, estructural y propiedades físicas del material alimenticio. (Koç *et al.*, 2008)

Si bien, el principal objetivo de los procesos de conservación basados en la reducción del contenido de agua en alimentos es prolongar su vida útil, también se produce como efecto secundario la reducción de peso y tamaño del producto. Esto implica ahorro en gastos de distribución, almacenamiento y transporte. A continuación, se mencionan ventajas y desventajas de un proceso de secado en alimentos.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del secado de alimentos.

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| Se pueden conservar alimentos por mayores periodos de tiempo | El tratamiento térmico puede degradar compuestos volátiles como la vitamina C, nutrientes, etc. |
| Se reduce el espacio de almacenamiento | Se alteran las características organolépticas (color, olor, sabor, textura, etc.) |
| Permite disminuir el desperdicio de alimentos | Dependiendo del alimento, se pueden necesitar largos periodos de tiempo para realizar el proceso de secado |

2.3.1. Tipos de secadores

En la actualidad, la industria de secado de alimentos cuenta con una gran variedad de secadores. Esto se debe a que estos equipos son diseñados en función de las características y propiedades del producto a secar, en conjunto con el mecanismo de transmisión de calor requerido. Entre los diversos tipos de secadores encontramos:

- Secadores directos: Utilizan gases calientes que suministran calor en contacto directo con el alimento, mediante convección. Ejemplos de este tipo

de secador son: Secadores de horno, secadores de bandeja, secadores de túnel, entre otros.

- Secadores indirectos: La transmisión de calor se realiza mediante conducción, por contacto entre un alimento y una superficie que lo contiene. Entre ejemplos de secadores indirectos se menciona: Liofilizadores, secadores de bandeja a vacío, tornillo sin fin, entre otros.
- Otros tipos: El mecanismo de transmisión de calor es la radiación. Entre ejemplos de este tipo de secador se destacan: Secadores por microondas, secadores dieléctricos, etc.

En la actualidad, el secado convectivo es el más utilizado en la industria, ya que sus costos no son muy elevados y el tiempo de secado no es muy alto, dando así productos de una calidad óptima para el consumidor. (Fructuoso, 2018). En comparación a métodos como la liofilización o la radiación que generan productos de mayor calidad, pero a tiempos de espera más largos, y por ende, mayores costos asociados.

Un secador convectivo o por aire caliente (figura 9), consiste principalmente en una cámara donde se introduce el elemento a secar, la que está equipada con un ventilador y conductos que permitan la circulación del aire caliente. El aire utilizado en este proceso, es calentado en la entrada del secador mediante intercambiadores de calor. El gas caliente en su circulación, se pone en contacto con el elemento a secar arrastrando agua de su superficie. Finalmente, la mezcla gas caliente-agua es dirigida fuera del secador para su eliminación, todo lo anterior en una sola operación.

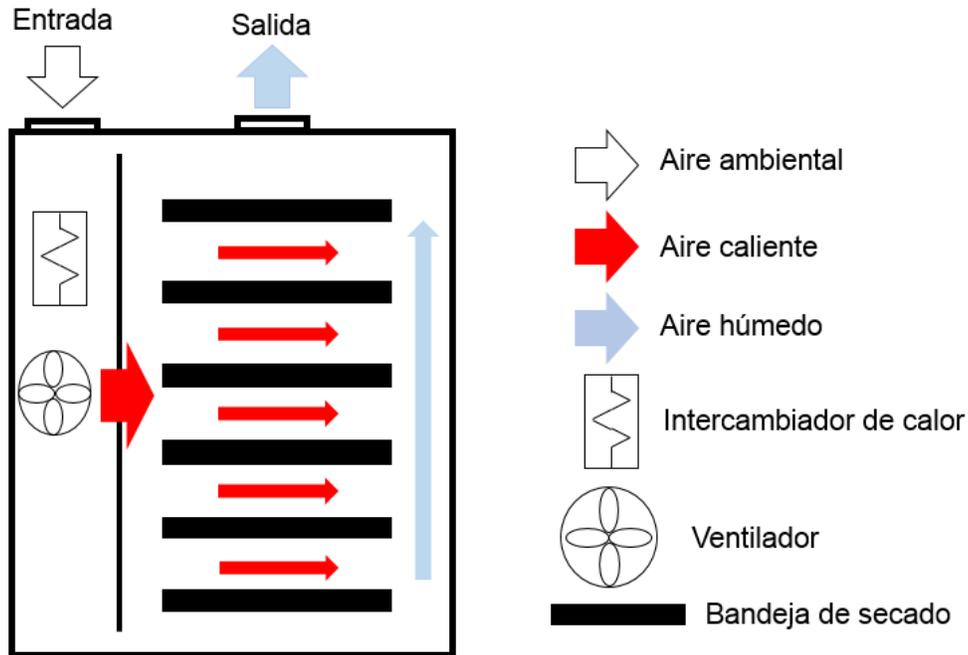


Fig. 9. Configuración típica de un secador de bandeja.

2.3.2. Propiedades del producto a secar

La presencia de agua en alimentos contribuye al proceso de deterioro de los mismos, por lo tanto, al disminuir el contenido de agua en un alimento se reducen las alteraciones biológicas ocurridas en el tiempo, junto a otros mecanismos de deterioro involucrados.

2.3.2.1. Contenido de Humedad

En alimentos, hace referencia a la cantidad de agua retenida en un alimento. El contenido de humedad se puede expresar de las siguientes maneras:

Base húmeda:

$$X_{bh} = \frac{m_a}{m} = \frac{m_a}{m_a + m_s} = \frac{\text{Kg de humedad}}{\text{Kg de material mojado}} \quad (1)$$

Base seca:

$$X_{bs} = \frac{m_a}{m_s} = \frac{\text{Kg de humedad}}{\text{Kg de material seco}} \quad (2)$$

Donde:

m : Masa total de un material (Kg)

m_a : Masa de agua contenida en un material (Kg)

m_s : Masa de materia seca en un material (Kg)

Se utiliza el contenido de humedad en base seca (X_{bs}) para comparar la masa de agua de un producto en relación a su masa seca. En cambio, el contenido de humedad expresado como base húmeda (X_{bh}) representa la relación entre la cantidad de agua de un producto respecto a su masa total.

Cuando se realiza modelamiento matemático en procesos de secado, los datos experimentales se expresan como tasa de pérdida de humedad o moisture rate (MR).

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3)$$

La tasa de pérdida de humedad es una medida adimensional que relaciona la cantidad de humedad libre en el tiempo (X_t), con el contenido de humedad inicial (X_0). X_e corresponde a la humedad de equilibrio, la cual en procesos de secado largos presenta valores relativamente pequeños, lo que permite expresar MR de la siguiente manera.

$$MR = \frac{X_t}{X_0} \quad (4)$$

2.3.2.2. Humedad en equilibrio

Se entiende como el mínimo contenido de humedad en el cual un material puede ser teóricamente secado. (Dávila, J. 2004). En este punto, el contenido de humedad de la muestra está en equilibrio termodinámico con el aire circundante. (Fructuoso, N. 2018). Una forma para determinar el contenido de humedad en equilibrio (X_e) es el método dinámico. Este consiste en pasar aire forzado a una temperatura y humedad controlada a través del producto de estudio, registrando el peso en distintos momentos del proceso. Lo anterior se representa en la siguiente ecuación:

$$X_e = \frac{m_e - m_s}{m_e} * 100 \quad (5)$$

Donde:

m_e : Masa de la muestra cuando alcanza el equilibrio con el aire circulante (Kg)

2.3.2.3. Actividad de agua

Se entiende como el agua “disponible” dentro de los alimentos, accesible para reacciones químicas, físicas y biológicas. Se define la actividad del agua como la razón de la presión de vapor de agua del alimento (P_v) y la presión de vapor del agua líquida pura (P_{vs}) a la misma temperatura, como se representa en la ec. 6.

$$a_w = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad 0 < a_w < 1 \quad (6)$$

La actividad de agua se encuentra comprendida entre los valores 0 a 1. La actividad de agua toma como referencia al agua pura, cuyo valor de actividad es 1. Cuando el valor de actividad de agua tiende a 1, el agua dentro de un alimento se aproxima a un estado libre, evaporándose al ambiente como agua pura. En caso contrario, con valores de actividad de agua inferiores a 1, se entiende que componentes dentro del alimento fijan de forma parcial al agua, dificultando su evaporación.

Los alimentos pueden contener de forma simultánea en agua en varias formas: agua libre, agua débilmente ligada y agua fuertemente ligada. Durante un proceso de

secado, se comienza eliminando primero las moléculas de agua en su estado más libre hasta llegar a la fracción más fuertemente ligada.

2.3.2.4. Isotermas de sorción

Se entiende una isoterma (figura 10) como una curva que relaciona la actividad de agua (a_w) y el contenido de humedad de un alimento. Si un producto alimenticio se hidrata, se obtendrá una isoterma de adsorción. Por el contrario, si el alimento se deshidrata se obtendrá una curva de desorción.

Se denomina histéresis al fenómeno donde la curva de desorción no es superponible a la curva de adsorción, a una temperatura determinada. Este fenómeno tiene repercusión principalmente en procesos de rehidratación, dando productos con actividad de agua superior a lo esperado, significando riesgo de deterioro.

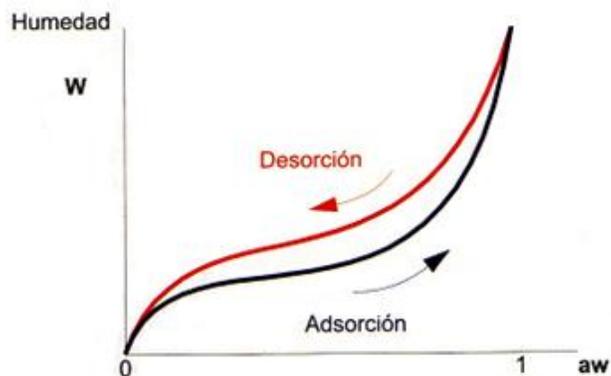


Fig. 10. Histéresis en Isotermas. (Casp y Abril, 1999)

En las isotermas se pueden distinguir 3 zonas, dependiendo de la forma en que el agua se encuentre ligada a los alimentos:

- Primera zona: Comprende entre valores de 0 y 0,2 de a_w . esta zona destaca por tener el agua de forma ligada o en interaccionan con el medio que la rodea

- Segunda zona: Se ubica en valores de actividad de agua de 0,2 a 0,7. El agua de esta zona esta débilmente ligada, permitiendo reacciones químicas mas no actividad microbiológica.
- Tercera zona: Abarca valores de actividad de agua de 0,7 hasta 1. En esta zona el agua se encuentra libre, dicho de otra manera, sin interaccionar con el medio que la rodea.

2.3.2.5. Cinética de Secado

Una cinética de secado consiste en el estudio del cambio del contenido de humedad promedio en función del tiempo. Mediante la cinética de secado se pueden definir parámetros como la cantidad de humedad evaporada, el tiempo de secado, el consumo de energía, etc.

Un proceso de secado es descrito normalmente mediante curvas de secado y curvas de velocidad de secado. Estas son obtenidas bajo condiciones de laboratorio, donde se mide el cambio de masa con el tiempo en base de muestras.

2.3.2.5.1. Curvas de Secado

Este tipo de curva muestra el contenido de humedad a través del tiempo durante un proceso de secado (figura 11). En este tipo de curvas es posible observar 3 etapas: El periodo de precalentamiento, periodo de velocidad constante y periodo de velocidad decreciente. Tal y como se describe en la tabla 5.

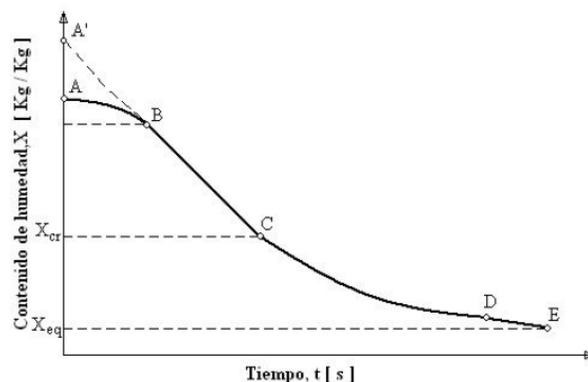


Fig. 11. Curva de secado. (Dávila, J. 2004)

Tabla 5. Características de una curva de secado.

| Etapa | Zona | Características |
|-----------------------|------|---|
| Precalentamiento | A-B | <ul style="list-style-type: none"> • El alimento se encuentra frío y con presión de vapor baja, lo que produce una velocidad de transferencia de masa lenta. • El alimento es calentado hasta alcanzar una temperatura de bulbo húmedo característica de un ambiente secante. |
| Velocidad constante | B-C | <ul style="list-style-type: none"> • Reducción importante del contenido de agua. • La evaporación del agua se efectúa en la superficie del alimento, a temperatura constante. • La etapa termina cuando del contenido de humedad medio se acerca al contenido de humedad crítica. • El ritmo de evaporación del agua en la superficie del alimento, es igual al agua que sale del interior del mismo. |
| Velocidad decreciente | C-D | <ul style="list-style-type: none"> • Se observa una disminución en la velocidad de secado. • Se dificulta la migración de agua por factores como obstrucción de los poros del alimento junto a una disminución de la superficie de transferencia efectiva • El contenido de humedad del alimento disminuye hasta alcanzar el equilibrio. |

2.3.2.5.2. Curva de velocidad de secado

Este tipo de curva (figura 12) indica la velocidad con que se seca un alimento. Al igual que con la curva de secado, es posible observar las etapas de precalentamiento, velocidad constante y velocidad decreciente.

Los factores que afectan la velocidad y el tiempo de secado son principalmente: Las propiedades del producto (tamaño y geometría), las propiedades del aire de secado (temperatura, humedad y velocidad) y el diseño del secador (en paralelo, a contracorriente, etc.).

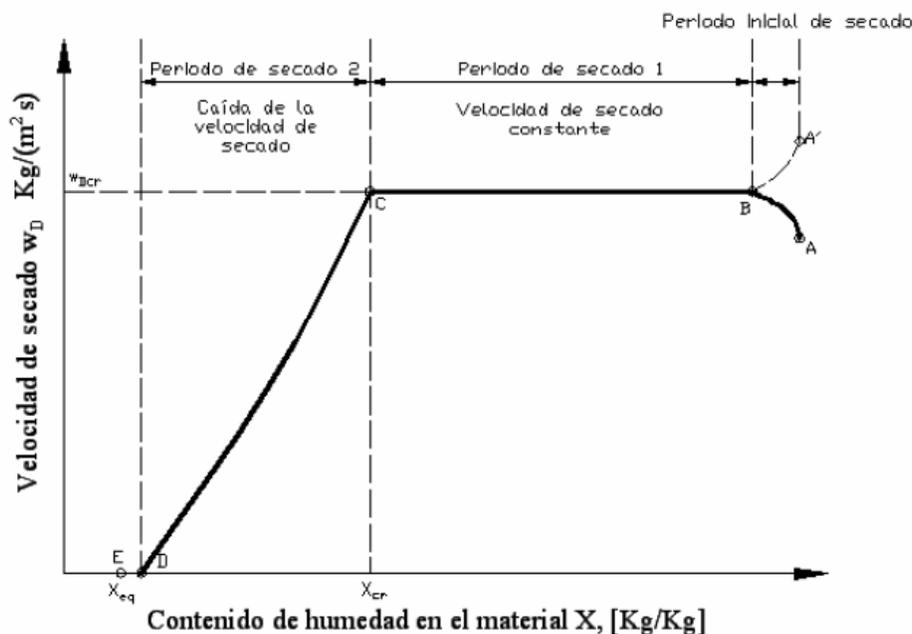


Fig. 12. Curva de velocidad de Secado. (Dávila, J. 2004)

2.4. Modelado Matemático para secado

Los modelos matemáticos son ecuaciones que permiten caracterizar o predecir la humedad en los alimentos durante un proceso de secado. En literatura es posible encontrar 3 tipos de modelos de secado: modelos teóricos, semi-teóricos y empíricos, los que se diferencian entre sí de acuerdo a la forma en que configuran la resistencia (interna o externa) durante la transferencia de humedad entre el alimento y el aire caliente.

- **Modelos teóricos:** Describen una solución mediante la ecuación de difusión y/o expresión simultánea de transferencia de masa y energía.
- **Modelos semi-teóricos:** Son los más utilizados, presentan componentes de los modelos teóricos y empíricos, y son derivados de la simplificación de la 2^oda ley de Fick de difusión.
- **Modelos empíricos:** Mediante una regresión, representan la relación directa entre la humedad y el tiempo de secado.

En el caso de sustancias complejas como los alimentos, las ecuaciones fundamentadas en fenómenos de transporte de materia y calor resultan ser matemáticamente complejas de solucionar.

Diversos autores como los mencionados en la tabla 6, proponen simplificaciones que reducen el número de incógnitas en un sistema, facilitando el uso de ecuaciones. Lo anterior deriva generalmente en la obtención de coeficiente empíricos que, si bien permiten describir con precisión un proceso, no permiten obtener información adicional que permita la mejora del mismo, por carecer de sentido físico. Por ejemplo, las soluciones propuestas de la segunda ley de Fick para transferencia de masa, permiten calcular la difusividad efectiva o aparente del agua y no la verdadera difusividad molecular, obteniendo de todas maneras, buenos resultados en cuanto a modelación de los coeficientes. La integración de la ecuación diferencial de Fick asume una serie de simplificaciones, mencionando entre ellos: la humedad inicial es homogénea y constante a lo largo del todo el volumen de producto, que el alimento utilizado es isotrópico, las condiciones de interfase solido-gas son constantes, entre otras.

Entre los modelos semi-teóricos de secado de capa delgada, se utilizan ampliamente el modelo de Henderson-Pabis, el modelo de Lewis (Newton), el modelo de Page y el modelo Logarítmico. (Ozdemir & Devres, 1999)

Tabla 6. Modelos matemáticos empíricos para secado. (Wang *et al.*, 2007)

| Nombre | Modelo | Referencia |
|-----------------|-----------------------------|----------------------------|
| Newton | $MR = \exp(-k_1 t)$ | Bruce (1985) |
| Page | $MR = \exp(-k_2 t^n)$ | Page (1949) |
| Henderson-Pabis | $MR = a_1 \exp(-k_3 t)$ | Henderson and Pabis (1961) |
| Logarítmico | $MR = a_2 \exp(-k_4 t) + C$ | Togrul y Pehlivan (2003) |

Uno de los modelos más simples es el modelo de Newton, que como se observa en la tabla 6 presenta el índice “k” que es una constante de velocidad. Este modelo tiene como premisa que la resistencia interna al movimiento del agua es despreciable y esta se localiza en la superficie del producto. En general este modelo no permite una simulación precisa de las curvas de secado en muchos alimentos, ya que subestima el comienzo de la curva de secado y sobreestima las etapas posteriores. (Simal *et al.*, 2005).

Para corregir los problemas del modelo de Newton, el modelo de Page introduce el índice “n” que propone una modificación empírica en el tiempo. El parámetro “n” modera el tiempo y mejora los resultados de predicción de la pérdida de humedad. (Azzouz *et al.*, 2002).

El modelo de Henderson-Pabis es el primer término de una serie de soluciones generales correspondientes a la segunda ley de Fick. La pendiente de este modelo (k) está relacionada con la difusividad efectiva cuando un proceso de secado tiene lugar solo en el periodo de velocidad decreciente y la difusión del líquido controla el proceso. (Madamba, Driscoll, & Buckle, 1996).

El modelo logarítmico es una adaptación experimental del modelo de Newton, que se aplicó con éxito para explicar las propiedades de secado de productos agrícolas. (Goyal *et al.*, 2006).

2.5. Difusividad efectiva

Para explicar los procesos de transporte durante el secado, se han propuesto varios mecanismos para el movimiento de la humedad dentro de los alimentos que incluyen difusión molecular, difusión impulsada por estrés, movimiento capilar y difusión de líquido a través de poros sólidos, difusión de vapor, etc. (Das y Arora, 2017)

No se puede decir que ninguno de estos mecanismos prevalezca a lo largo del curso del secado. Varios investigadores han recomendado que es ventajoso describir la tasa de transporte interno de humedad mediante una difusividad efectiva promedio, dado que no se puede afirmar que un mecanismo prevalezca a lo largo del secado. (Arslan y Özcan, 2011)

Los mecanismos de transporte de humedad durante un proceso de secado se pueden modelar matemáticamente a partir de la segunda ley de Fick. Si la difusión ocurre en 3 dimensiones, el proceso puede ser representado mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

Donde M es el contenido de humedad, t es el tiempo, (x,y,z) son las coordenadas espaciales y D_{ef} la difusividad efectiva. Reemplazando $\Delta = \left(\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \right)$ y $M = MR$, de la expresión anterior obtenemos:

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = D_{ef} \Delta^2 MR \quad (8)$$

Las soluciones de las ecuaciones diferenciales anteriores varían dependiendo de la geometría de la muestra de estudio. Para geometrías simples como laminas, cilindros, esferas y paralelepípedos, Crank en 1975 asumiendo una difusión efectiva constante, ausencia de encogimiento o de cualquier resistencia al transporte de masa, propuso la siguiente solución:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right] \quad (9)$$

Donde L representa el espesor de una rebanada o lamina y n el número de series de la sumatoria. Utilizando el primer término (n = 1) cuando los tiempos de secado son considerables, la ecuación (9) puede reducirse a:

$$MR = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[\frac{\pi^2 D_{ef} t}{4L^2}\right] \quad (10)$$

Aplicando logaritmo natural a la expresión (10), se obtiene una ecuación que permite calcular la difusividad efectiva de la humedad:

$$\ln(MR) = -0,21 + \left(-\frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2}\right)t \quad (11)$$

Graficando con datos experimentales, se obtiene la pendiente de la ecuación lineal:

$$Pendiente = -\frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2} \quad (12)$$

Expresión que permite obtener la difusividad efectiva al despejar D_{ef}

$$D_{ef} = -\frac{4L^2 Pendiente}{\pi^2} \quad (13)$$

2.6. Energía de activación

La energía de activación en un procedimiento de secado (E_a) es la cantidad mínima de energía que debe superarse para que el proceso sea realizable. El valor de E_a esta estrechamente relacionado con la D_{ef} , y su dependencia con la temperatura puede expresarse con el modelo de Arrhenius (Koukouch *et al.*, 2017).

$$D_{ef} = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (14)$$

Donde:

D_{ef} : Difusividad efectiva (m^2/s)

D_0 : Factor de Arrhenius (m^2/s)

E_a : Energía de activación (kJ/mol)

R: Constante universal de los gases ($8,3143 \cdot 10^{-3}$ kJ/mol °K)

T: Temperatura (°K)

2.7. Correlación de coeficientes y análisis de error

Un estadístico matemático consiste en una prueba a la que se somete un conjunto de datos con el fin de conocer distribuciones de frecuencia. En procesos de secado permiten valorar el buen ajuste de los modelos matemáticos evaluando los datos experimentales. Las pruebas más utilizadas son el coeficiente de correlación (R^2), chi-cuadrado (X^2), la suma de errores al cuadrado (SSE) y la raíz cuadrada de la suma de los errores al cuadrado (RMSE) como se observa en la tabla 7.

El coeficiente de correlación (R^2) se utiliza para probar la relación lineal entre los valores medidos y los estimados. Chi-cuadrado (X^2) permite saber si existe concordancia entre los valores medidos y los estimados. La suma de errores al cuadrado (SSE) proporciona información sobre el rendimiento a largo plazo de las correlaciones al permitir una comparación de la desviación real entre los valores predichos y medidos experimentalmente término por término. Finalmente, la raíz cuadrada de la suma de los errores al cuadrado (RMSE) entrega información sobre el rendimiento a corto plazo, teniendo siempre valores positivos y representando el cero como valor ideal.

Valores bajos para los coeficientes estadísticos X^2 , SSE y RMSE (~ 0) y valores altos para R^2 (~ 1) representan mejores ajustes de las curvas de secado experimentales. (Wang *et al.*, 2007)

Tabla 7. Estadísticos matemáticos. (Wang *et al.*, 2007)

| Estadístico matemático | Expresión |
|------------------------|---|
| R^2 | $R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre\ i} - \overline{MR_{pre\ i}})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_{exp\ i} - \overline{MR_{exp\ i}})^2}$ |
| X^2 | $X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp\ i} - MR_{pre\ i})^2}{N-z}$ |
| SSE | $SSE = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (MR_{exp\ i} - MR_{pre\ i})^2$ |
| RMSE | $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (MR_{exp\ i} - MR_{pre\ i})^2}$ |

Donde:

- $MR_{exp\ i}$: i-esimo cociente de humedad experimental
- $MR_{pre\ i}$: i-esimo cociente de humedad predicha
- **N**: número de observaciones
- **Z**: número de constantes

2.8. Propiedades físicas en los alimentos

Las propiedades físicas se entienden como los atributos de un sistema que son medibles. En alimentos se pueden mencionar como propiedades físicas el tamaño, forma, volumen, color, textura, aroma, valor nutritivo, entre otros. La medición de estas propiedades permite definir la calidad de un alimento a lo largo de su vida útil.

Los alimentos al deshidratarse sufren cambios físicos-químicos que alteran sus propiedades, modificando su calidad final. Uno de los objetivos al deshidratar alimentos es mantener las propiedades sensoriales lo más cercanas al producto fresco. Dentro de los principales parámetros que se controlan en los alimentos se encuentran el color, textura, volumen, estabilidad y valor nutritivo. Para este trabajo se estudiaron las propiedades de volumen y color a lo largo del proceso de secado.

2.8.1 Volumen

Entendemos el volumen como el espacio tridimensional que ocupa un objeto. En el sistema internacional, se utiliza el metro cubico como unidad de medida. El volumen de un cuerpo puede ser medido de distintas maneras, mencionando:

- **Volumen real:** Puede determinarse utilizando un esteropícnómetro (de helio o nitrógeno). Como ventaja este método entrega resultados exactos, pero requiere de una calibración muy precisa, pues ligeras variaciones en la presión del gas utilizado, tiene como efecto el incremento significativo del error en la medición.
- **Volumen aparente:** Puede determinarse mediante el desplazamiento volumétrico, técnica que consiste en sumergir un sólido no absorbente en un fluido, midiendo el volumen desplazado (ecuación 15). Como ventaja se menciona que es un proceso simple, rápido y se puede aplicar a cuerpos de cualquier forma. Como desventaja se resalta el posible error de medición por la existencia de burbujas en la muestra o el fluido de inmersión, además de no ser un proceso automático.

$$E = V_{cpo} * \rho_{liq} * g \quad (15)$$

Donde:

E: Empuje

V_{cpo} : Volumen que desplaza el cuerpo (m^3)

ρ_{liq} : Densidad del líquido donde se sumerge el cuerpo (kg/m^3)

g: Fuerza de gravedad ($9,81 m/s^2$)

2.8.1.1. Desplazamiento de solidos

Este método se basa en la premisa de que el volumen de un objeto es el espacio que ese cuerpo ocupa. Para su uso se requiere de un material solido pequeño que al estar en gran cantidad se comporte como un líquido (capacidad de fluir) como lo son la arena, semillas pequeñas, bolas de cristal, etc.

El procedimiento consiste primero en determinar el peso del material pequeño (m_1). Para esto se utiliza un recipiente de volumen conocido (V_1) y se llena a su máxima capacidad. Posteriormente, en el mismo recipiente se coloca la muestra de estudio y se completa el volumen con material pequeño, pesando nuevamente (m_2). Considerando que la muestra de estudio (m_3) y el recipiente (m_4) tienen peso conocido, se puede determinar la masa de material pequeño con la siguiente expresión:

$$m_1 = m_2 - m_3 - m_4 \quad (16)$$

Finalmente se calcula el volumen de la muestra de estudio (V_2) con la ecuación 17. Para esto determinamos el volumen del material pequeño (V_3) mediante su peso (m_1) y densidad teórica.

$$V_2 = V_1 - V_3 \quad (17)$$

2.8.1.2. Encogimiento durante secado

Se entiende al encogimiento (S) como una reducción de volumen durante un proceso de secado. El agua removida produce un desbalance entre la presiones internas y externas del material, generando fuerzas de tensión y contracción que conducen al colapso de su estructura, geometría y posible agrietamiento. En alimentos, el encogimiento se produce cuando la matriz viscoelástica del producto se contrae en el espacio ocupado anteriormente por el agua extraída. A mayor agua removida, mayor será el encogimiento del alimento por efecto de la presión de contracción. (Mayor & Sereno, 2004)

Este fenómeno puede describirse como la relación entre el volumen final (V_f) y el volumen inicial (V_0) de un alimento al ser sometido a un tratamiento, tal y como se describe en la ecuación 18.

$$S = \frac{V_f}{V_0} \quad (18)$$

El encogimiento puede ser considerado como un factor de pérdida de calidad en algunos alimentos deshidratados, tales como la manzana y las peras. Sin embargo, en otros casos como las pasas de uvas, este se considera uno de sus atributos característicos. (Mayor & Sereno, 2004)

Entre los efectos de la deshidratación de tejido vegetal, autores como Alzamora *et al.* (2000) y Santacruz-Vázquez *et al.* (2010), mencionan la modificación de la cristalinidad de la pared celular y pérdida de funcionalidad de la membrana plasmática debido al estrés osmótico causado por la pérdida de turgencia en la célula. Lo anterior tiene como consecuencia un cambio en el coeficiente de difusión y la velocidad de secado.

2.8.2 Color

Se puede definir al color como un fenómeno de percepción visual que se produce por el reflejo de la luz en la superficie de un cuerpo, evento que es percibido por un observador. Este fenómeno es una característica de la luz y puede ser medida en términos de intensidad y longitud de onda.

La existencia de diferentes combinaciones de colores, incluyendo el blanco y negro, son infinitas. Debido a lo anterior, se vuelve necesario un sistema de clasificación que permita organizar las posibles variaciones. Una de las formas de clasificación se basa en sus propiedades. Las principales propiedades en las que se clasifican los colores se encuentran descritas a continuación:

- **Tono (*hue, h**)**: Atributo que señala el estado de pureza de un color, permitiendo diferenciar un color de otro durante una mezcla.
- **Saturación (*saturation, C**)**: Atributo que indica la intensidad o pureza de un color. A mayor saturación, mayor pureza de color.
- **Luminosidad (*lightness, L**)**: Atributo que hace referencia a la cantidad de luz que es capaz de reflejar un color.

El color es considerado uno de los más importantes parámetros en la calidad de los alimentos deshidratados. (Chen & Martynenko, 2013) Este atributo puede ser relacionado a condiciones como el grado de madurez o deterioro en productos dañados.

El color de un alimento se ve afectado por muchos factores, mencionando la capacidad de su superficie para absorber, dispersar, reflejar o transmitir la luz visible. Como se mencionó anteriormente, el proceso de secado modifica las propiedades físico-químicas de los alimentos, lo que tiene como efecto una alteración en la relación entre la superficie del producto y la luz visible. En adición, durante un proceso de secado se ven afectados los pigmentos de un alimento, por efecto de la temperatura que produce la degradación de los mismos.

2.8.2.1. Modelo de color

Un modelo de color corresponde a una expresión matemática que permite representar a los colores de forma numérica, dicho de otra manera, es un sistema que permite asociar vectores numéricos a las propiedades de los colores, generando un “espacio de color”. Entre los espacios de color más utilizados se mencionan:

- **Espacio de color RGB**: Modelo de color aditivo que utiliza la luz transmitida para mostrar colores. Este espacio se basa en los colores rojo, verde y azul para crear el resto de colores. Este modelo está estrechamente relacionado con la forma en que los humanos perciben el color en la retina. Su uso está centrado principalmente en las pantallas (televisores, computadores, etc.),

donde se producen pixeles de colores disparado cañones de electrones (rojos, verdes y azules) a los fósforos de la pantalla. Este espacio de color depende del dispositivo utilizado, ya que su gama de colores varía según el dispositivo de visualización.

- **Espacio de color CMYK:** Modelo de color sustractivo utilizado principalmente en impresoras. Este espacio se basa en los colores cian, magenta, amarillo y negro para formar el resto de gama de colores.
- **Espacio de color CIELAB:** Este modelo fue desarrollado por la Comisión Internationale d`Eclairage (CIE) en 1976, siendo un estándar internacional para la medición de color. Este espacio se compone de 3 componentes: luminosidad (L^*) que consta con valores de 0 (oscuro) a 100 (luminoso), componente cromático a^* con valores de -120 (verde) a +120 (rojo) y componente cromático b^* representando desde -120 (azul) hasta +120 (amarillo). Este sistema de color es independiente del dispositivo utilizado y a menudo es empleado en estudios de investigación en alimentos.

2.9. Visión por computadora

Hoy en día, la necesidad de contar con herramientas precisas para analizar las características físicas de los objetos ha ido en aumento. En el área de los alimentos, la búsqueda de técnicas no destructivas que favorezcan la estandarización en la calidad de estos, ha impulsado el desarrollo de Sistemas de Procesamiento y Análisis de Imágenes Digitales (SPAID).

Una imagen digital puede entenderse como una representación bidimensional de un objeto o escenario, a partir de una matriz numérica.

El análisis de imagen es la técnica mediante la cual se extrae información de una imagen, para realizar una medición, interpretación y toma de decisión.

Dentro de los SPAID podemos mencionar la visión por computadora, que es una disciplina científica cuyo objetivo es obtener información de las propiedades físicas, geométricas y topológicas de un objeto, a través de una imagen.

Hoy en día, los sistemas de visión por computadora (CVS) han incrementado su uso en la industria alimentaria, principalmente en trabajos de control de calidad. Estos sistemas ofrecen la posibilidad de automatizar el análisis, estandarizando las técnicas y eliminando la inspección manual. (Brosnan & Sun, 2004) Entre ejemplos se mencionan el análisis de color para determinar el grado de madurez (Barceló *et al.*, 2013), evaluación y determinación de características sensoriales (Du & Sun, 2005), calcular áreas de productos irregulares (Sampson *et al.*, 2014), entre otros.

Un CVS está compuesto generalmente por un sistema de iluminación, una cámara digital, un equipo computacional y un programa que permita procesar y analizar información. En la figura 13 se presenta una configuración tradicional de CVS.

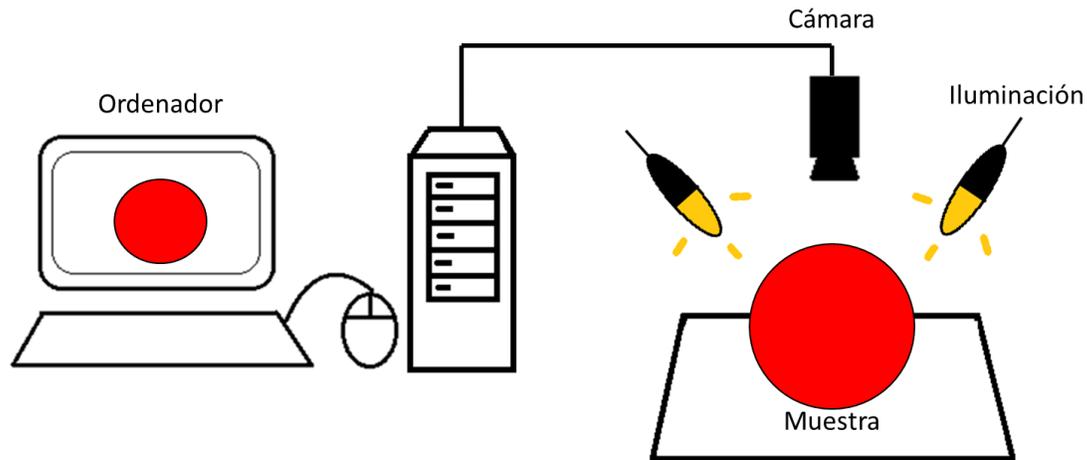


Fig. 13 Configuración común para un sistema de visión por computadora.

2.9.1. Medición de color

Una imagen digital puede dividir su superficie en celdas cuadradas, lo que se conoce como mapa de bips. En cada celda de esta superficie se aloja un pixel, que es la menor unidad homogénea en que se puede dividir una imagen digital. Cada pixel tiene una posición y valor de color específico. Durante un análisis de color mediante visión por computadora, se registran los valores de color en los pixeles de una imagen, mediante el uso de un sensor.

2.9.1.1. Sistema de iluminación

Al capturar una imagen a color, es importante contar con una fuente de luz adecuada, pues el color depende en parte del espectro que refleja. Por lo anterior, la fuente de luz debe estandarizarse. La CIE ha definido iluminantes estándar, especificados por color y temperatura. Los iluminantes utilizados comúnmente en alimentos son A (2856 K), C (6774 K), D 65 (6500 K) y D (7500), siendo los 2 últimos diseñados para imitarla luz de día. (Lawless & Heymann, 1998)

La distribución del iluminante también es un factor importante a considerar. El ángulo entre el sensor (lente de cámara digital) y la fuente de iluminación debe ser de 45°, pues la reflexión difusa responsable del color ocurre a 45° de luz incidente. (Francis & Clydesdale, 1975)

2.9.1.2. Cámara digital

Una cámara digital graba una imagen mediante un sensor de luz eléctrica. Existen 2 factores principales que afectan la calidad de una imagen: la resolución y la compresión o formato del archivo. El primer término hace referencia a la cantidad de píxeles por unidad de medida que tiene una imagen (píxeles por cm o pulgadas), a mayor cantidad de píxeles, mayor resolución y por ende mayor calidad de imagen. El segundo término se refiere a la forma de almacenar una imagen (memoria ocupada), comprimir un archivo (cambiar de formato) reduce la cantidad de memoria que ocupa una imagen, perdiendo calidad de la misma. Para fines de investigación, se prefiere un archivo no comprimido a uno comprimido. (Yam & Papadakis, 2004)

El formato de imagen más popular es JPG, el cual es capaz de almacenar 24 bits por píxel. Pero este corresponde a un archivo comprimido, razón por la cual es recomendable cambiar el tipo de formato. TIFF (Tagged Image File Format) es un formato de archivo de compresión no destructiva capaz de almacenar hasta 96 bits por píxel, siendo capaz de mostrar 16,7 millones de colores, lo que lo hace perfecto para estudiar imágenes digitales de alta calidad.

2.9.1.3. Análisis de color

Una vez tomada una imagen digital, corresponde el análisis de la misma. Para este trabajo se utilizó como software de análisis de color el programa Photoshop por su capacidad de gestión de color.

Photoshop es un software utilizado principalmente por productores gráficos y fotógrafos para el retoque fotográfico y la edición de imágenes. Este programa cuenta con varias funciones que permiten analizar color tanto en un solo punto de la imagen (Info Palette) como en una zona (Histogram Window). Este software cuenta con capacidades iguales o superiores a otros programas para administrar color, razón por la cual está disponible en muchos laboratorios y cuenta con fuerte respaldo por parte del fabricante y los usuarios. (Yam & Papadakis, 2004)

Para un análisis cuantitativo del color, se recomienda utilizar la escala de color CIELAB por su independencia al dispositivo utilizado y una mayor gama de colores respecto a otras escalas. Photoshop es capaz de mostrar los colores de una imagen en valores L^* , a^* y b^* .

Para el análisis de color mediante Photoshop, se seguirá la metodología descrita por Yam & Papadakis (2004). Este procedimiento hace uso de la ventana histograma para determinar las distribuciones de color a lo largo de los ejes X e Y. Esta función muestra las estadísticas (media, desviación estándar, mediana, entre otros.) de los valores de color para el área seleccionada de una imagen.

Los parámetros L, a y b presentados en esta función no son los valores de color estándar. Para obtener dichos valores, se deben utilizar las siguientes expresiones:

$$L^* = \frac{Lightness}{255} * 100 \quad (19)$$

$$a^* = \frac{240a}{255} - 120 \quad (20)$$

$$b^* = \frac{240b}{255} - 120 \quad (21)$$

Utilizar el histograma para obtener valores promedio a diferencia de analizar el valor de un solo pixel (Info Palette), permite reducir el “ruido” de los datos. Este “ruido” se

genera por la presencia de zonas oscuras en la imagen en conjunto con la sobre representación que genera el seleccionar un solo pixel en lugar de la imagen o una zona de esta.

Para analizar el cambio de color, se determina la diferencia de los componentes L^* , a^* y b^* , en conjunto con la diferencia global de color (ΔE^*).

$$\Delta L^* = L^* - L^*_0 \quad (22)$$

$$\Delta a^* = a^* - a^*_0 \quad (23)$$

$$\Delta b^* = b^* - b^*_0 \quad (24)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (25)$$

Donde L^*_0 , a^*_0 y b^*_0 son los valores iniciales de la muestra.

2.10. Pretratamientos

Con el fin de mejorar la calidad (retener aroma, color, etc.) y ralentizar procesos indeseados (pardeamiento enzimático, etc.) se aplican pretratamientos en alimentos. En el caso de los procesos de secado, un pretratamiento puede afectar de forma efectiva la transferencia de calor y masa, mejorando la eficiencia de secado y disminuyendo el deterioro en la calidad de los alimentos.

- **Escaldado:** Consiste en un tratamiento térmico que se aplica principalmente a productos vegetales. Durante un proceso de escaldado no se destruyen microorganismos ni se alarga la vida útil de los alimentos. Se usa principalmente este tratamiento como una etapa previa para otros procesamientos. El objetivo principal del escaldado es inactivar enzimas que afectan al color, sabor y contenido vitamínico de un alimento. Dentro del contexto de secado de alimentos, el escaldado acelera la deshidratación por la generación de rupturas en la piel o superficie de un producto alimenticio, facilitando la salida de humedad.
- **Ultrasonido:** Puede definirse como un tratamiento mecánico con ondas acústicas de frecuencia superior a 20 kHz, las que son alternadas en ciclos

de expansión y compresión. Los principales efectos del ultrasonido según Nowacka (2016), son el “efecto esponja” y la cavitación. Durante el ciclo de expansión, se produce la creación y crecimiento de burbujas en el medio (efecto esponja). Cuando estas burbujas crecen hasta un volumen donde ya no pueden absorber más energía implosionan creando microcorrientes, destrucción de moléculas del líquido e inactivación de microorganismo (cavitación). La cavitación y la acción mecánica del ultrasonido afectan la superficie y la estructura interna de los materiales que se tratan, lo que incluye un aumento de los poros celulares, una reducción de la resistencia a la migración de agua y una mejora en la eficiencia de la transferencia de calor y masa. (Liu et al., 2021) La aplicación de ultrasonido en frutas y hortalizas antes del proceso de secado permite obtener productos de alta calidad nutricional, sensorial y bioactividad.

En la figura 14 se aprecia el efecto de aplicar ultrasonido y escaldado en la estructura del arándano mediante micrografía por microscopio electrónico de barrido ambiental (ESEM) para la superficie del fruto y microscopio de luz (LM) para su estructura.

Entre los impactos que generan los tratamientos anteriores, Fava *et al.* (2006) menciona que la superficie del fruto cambia de ser fisurada y reticulada, a poseer un aspecto más poroso con la aparición de rupturas en forma de agujeros anchos y profundos. En cuanto a su estructura, los pretratamientos generaron el rompimiento de paredes y membranas celulares (flechas), junto a un inicio incipiente de plasmólisis.

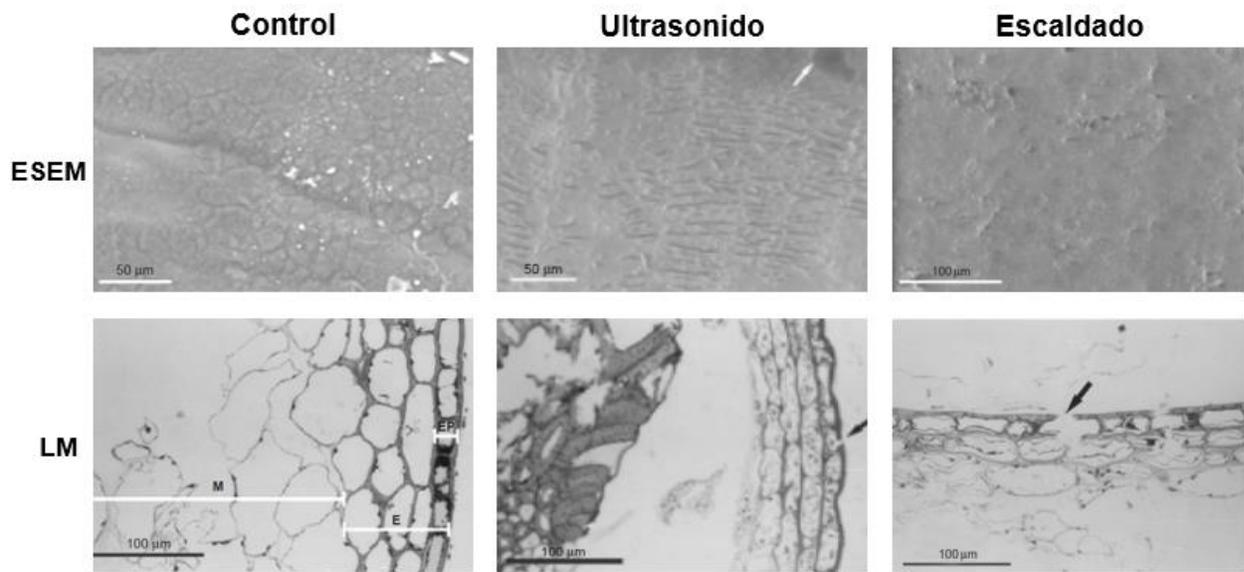


Fig. 14 Efectos en la estructura del arándano (*V. Corymbosum*) al aplicar ultrasonido y escaldado.
(Fava *et al.*, 2006)

3. HIPOTESIS

El uso de pretratamientos durante el proceso de secado por convección de arándanos, modifica la velocidad de secado, influyendo en las características visibles del fruto como lo son el color y el volumen (encogimiento del fruto)

4. OBJETIVO

4.1. Objetivo General

- Estudiar el efecto de pretratamientos sobre arándano highbush (*Vaccinium Corymbosum*) durante un proceso de secado, mediante un análisis y procesamiento de imágenes por visión por computadora.

4.2. Objetivos Específicos

- Realizar una caracterización física del arándano (color y volumen) durante el secado, junto a los cambios que se producen en el tiempo.
- Estudiar la cinética de secado y parámetros asociados del Arándano a distintas temperaturas y tratamientos.
- Estudiar la evolución en las imágenes del arándano durante el proceso de secado.

5. MATERIALES Y METODOS

5.1. Materiales y equipo

5.1.1. Materia prima

Se utilizaron arándanos (*Vaccinium Corymbosum*) frescos, de origen chileno, distribuidos por DOLE CHILE S.A. En bandejas de plástico de 125 g, la que fue adquirida en un supermercado local.

5.1.2. Semillas de amapola

Para la determinación de volumen mediante el método de desplazamiento de sólidos, se utilizaron semillas de amapola. La densidad de este producto es de 1,1 g/cm³, similar al agua.

5.1.3. Balanza

Durante el trabajo, se utilizó una balanza analítica marca Radwag, modelo AS 220.R2 cuya precisión es de $\pm 0,1$ mg. Esta balanza fue utilizada para obtener los pesos de la fruta a lo largo del proceso de secado junto a la determinación del peso para la obtención del volumen por el método de desplazamiento de sólidos.

5.1.4. Equipo de secado convectivo

El equipo de secado principal fue un horno de secado convectivo marca LABTECH, modelo LDO 080-F. Las condiciones de secado fueron de 50, 60 y 70°C hasta conseguir peso constante de la muestra. Todo lo anterior a una velocidad de aire caliente constante de $1 \pm 0,1$ m/s.

5.1.5. Equipo de secado al vacío

Para la determinación de humedad inicial de los arándanos, se utilizó un horno de secado al vacío marca Mlab, modelo MVO-024. Las condiciones de secado fueron de 60°C con presión de 0,085 MPa.

5.1.6. Equipo de ultrasonido

Para la aplicación del pretratamiento de ultrasonido, se utilizó un baño de ultrasonido marca WISE CLEAN, modelo WUC-D06H con frecuencia de 60 kHz.

5.1.7. Sistema de Visión por Computadora (CVS)

La configuración de CVS utilizado consistió en un sistema de captura de imagen (muestra, fuente de luz y cámara digital) compuesto de una cámara de 25 cm de ancho, 25 cm de alto y 35 cm de largo construida a base a placas de MFD (Medium Density Fiberboard), la cual fue forrada con papel de color amarillo, con fin de generar un contraste de color respecto a los arándanos. Dicha cámara cuenta con un sistema de iluminación correspondiente a 2 tubos fluorescentes T4 de 6 Watts de potencia y color temperatura de 6400 K montados en esquineros a 45° respecto a la ubicación de la muestra. La cámara digital utilizada tiene una resolución de 65 megapíxeles, y se encuentra a una distancia de disparo entre la muestra y la cámara fotográfica de 140 mm. La toma de la fotografía fue realizada bajo las siguientes condiciones: selección automática, sin flash y autoenfoco encendido. Lo anterior se representa en las figuras 15 y 16.

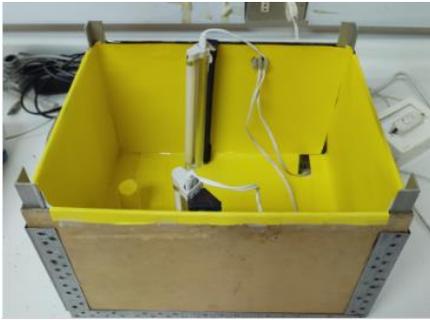


Fig. 15 Sistema de captura de imagen

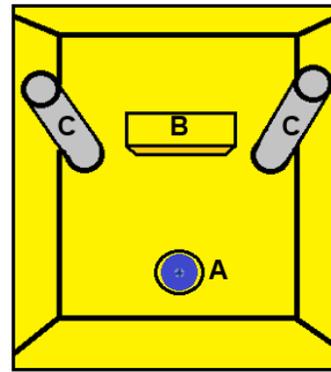


Fig. 16 Esquema del sistema de captura de imagen (vista aérea)

El software utilizado para el estudio de color de la muestra durante el proceso de secado fue Adobe Photoshop CC versión 14.0.0.0. Las características del ordenador utilizado son: un procesador Intel(R) Core (TM) I7-5500U y una memoria RAM de 4,0 GB. La figura 17 muestra un esquema simplificado del CVS descrito anteriormente.

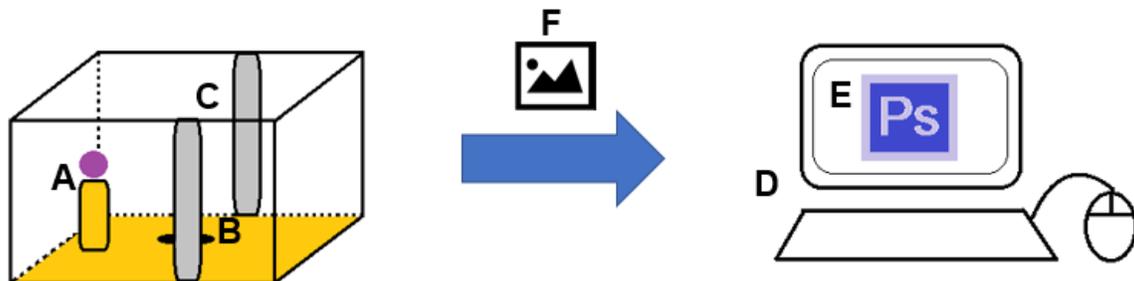


Fig. 17 Esquema de Sistema de Visión por Computadora.

- A: Muestra de estudio
- B: Ubicación de cámara digital
- C: Sistema de iluminación
- D: Equipo computacional
- E: Software de análisis de imagen
- F: Imagen digital

5.2. Métodos utilizados

5.2.1. Procedimiento de secado

Para el estudio del secado de los arándanos, se realizaron experiencias de secado a 50, 60 y 70°C con una velocidad de aire de $1 \pm 0,1$ m/s.

El primer paso consistió en poner en marcha el horno de secado convectivo en las condiciones de temperatura y velocidad de aire correspondientes a la experiencia a realizar. Mientras la temperatura del horno subía y se estabilizaba, se aplicaron pretratamientos en las muestras de arándanos, descritos a continuación:

- **Control:** Ausencia de pretratamiento, solo se realizó control visual (ausencia de moho, deterioro, manchas y cortes), medición de diámetro y altura, y se procedió a lavar con agua para eliminar residuos y sustancias adheridas.
- **Escaldado:** Las muestras se sometieron a vapor saturado 95°C por 2 minutos. Posteriormente, se dejaron enfriar los arándanos en una fuente con agua fría (10°C) por 5 min. Finalmente, las muestras se reposaron en papel absorbente para eliminar el exceso de agua.
- **Ultrasonido:** Las muestras se dispusieron en un baño de ultrasonido a 40 kHz por 25 minutos, utilizando como medio transmisor agua destilada. La temperatura bajo la que se trabajó fue ambiental. Finalizado lo anterior, se dispusieron los frutos en papel absorbente para eliminar el exceso de agua.

Terminados los pretratamientos, se procedió a registrar peso, volumen y tomar una imagen de la muestra, para finalmente disponer los arándanos en el horno de secado utilizando bandejas con rejillas que permitan el flujo de aire.

Se repitió el proceso de registrar peso, volumen y toma de imagen cada 15 minutos durante las primeras 4 horas y luego por cada hora hasta llegar a peso constante, realizando cada experiencia en triplicado.

5.2.2. Determinación de cinéticas de secado

A partir de los datos de secado obtenidos, se expresó el contenido de humedad de los arándanos como tasa de pérdida de humedad (MR) mediante la expresión descrita en el punto 2.3.2.1. Con la información anterior, se construyeron curvas de secado y curvas de velocidad de secado comparando MR en función del tiempo.

Las curvas de secado obtenidas fueron evaluadas con distintos modelos de secado (tabla 6), a fin de determinar cuál modelo describe mejor el fenómeno estudiado.

Adicionalmente, se calculó la difusividad efectiva junto a la energía de activación del proceso, siguiendo las ecuaciones descritas en los puntos 2.5 y 2.6 respectivamente.

5.2.3. Determinación de humedad inicial

La humedad inicial de la fruta fresca se determinó por triplicado en un horno de secado al vacío a 60°C y una presión de 0,085 MPa. Las muestras se pesaron en balanza analítica de precisión $\pm 0,1$ mg

5.2.4. Caracterización física de la muestra

Se procedió a caracterizar físicamente el fruto del arándano, mediante el registro de imagen, volumen y peso antes, durante y después del proceso de secado.

5.2.4.1 Determinación de volumen

El volumen de las muestras se obtuvo mediante el método de desplazamiento de sólidos descrito en el punto 2.8.1.1. En esta experiencia se utilizó un recipiente de 26,633 gr de peso y capacidad de 198 ml.

La variación de volumen a lo largo del proceso de secado fue expresada como encogimiento (S), siguiendo la ecuación descrita en el punto 2.8.1.2.

5.2.4.2. Determinación de color

El color de las muestras fue obtenido mediante procesamiento de imágenes digitales utilizando el sistema de visión por computadora (CVS) descrito en el punto 5.1.7.

Antes de procesar las imágenes, estas debieron ser tratadas a fin de mejorar la determinación de color por parte del software. El tratamiento recibido se describe a continuación:

En primer lugar, se cambió el formato de la imagen digital de .JPG (por defecto de la cámara digital) a .TIFF.

En segundo lugar, se recortó el fondo de la imagen, razón por la cual era importante que el color del fondo contrastara al de la muestra. La detección de figuras por parte del programa no era perfecta, dejando una ligera silueta alrededor del arándano. Para que este factor no afectara el análisis de color, se seleccionó un área de la muestra ligeramente más pequeña como zona de determinación de color. Lo anterior se representa en la siguiente figura.



Fig. 18 Procesamiento de imagen digital para análisis de color

Finalmente, se obtuvieron los valores color promedio de la muestra mediante Histogram Window. (figura 19)

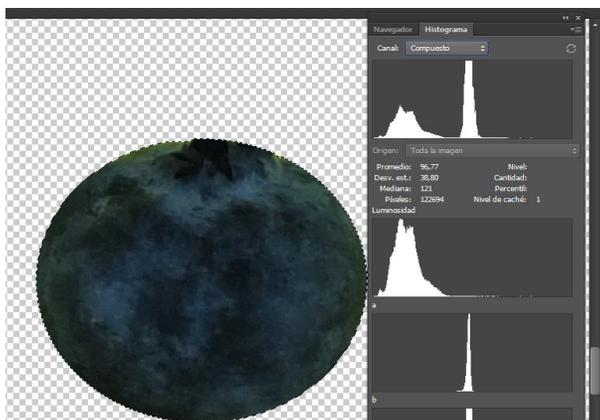


Fig. 19 Valores color de arándano mediante Histogram Window

5.2.5. Análisis estadístico

Todas las mediciones se realizaron por triplicado y se expresaron los resultados como media desviación estándar.

Se realizó un análisis ANOVA simple con 95% de confianza y prueba de múltiples rangos (Tukey), para medir las diferencias significativas en los datos experimentales. Lo anterior se realizó mediante el programa Statgraphics 19.

Para determinar el mejor ajuste de curva en los modelos matemáticos, se aplicaron los estadísticos matemáticos R^2 , X^2 , SSE y RMSE.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Contenido de humedad inicial

El contenido inicial de agua fue de $86 \pm 1,6$ g/100 g arándanos. Este valor se encuentra en concordancia con resultados bibliográficos anteriores. (USDA, 2019)

6.2. Efecto de la temperatura sobre la cinética de secado.

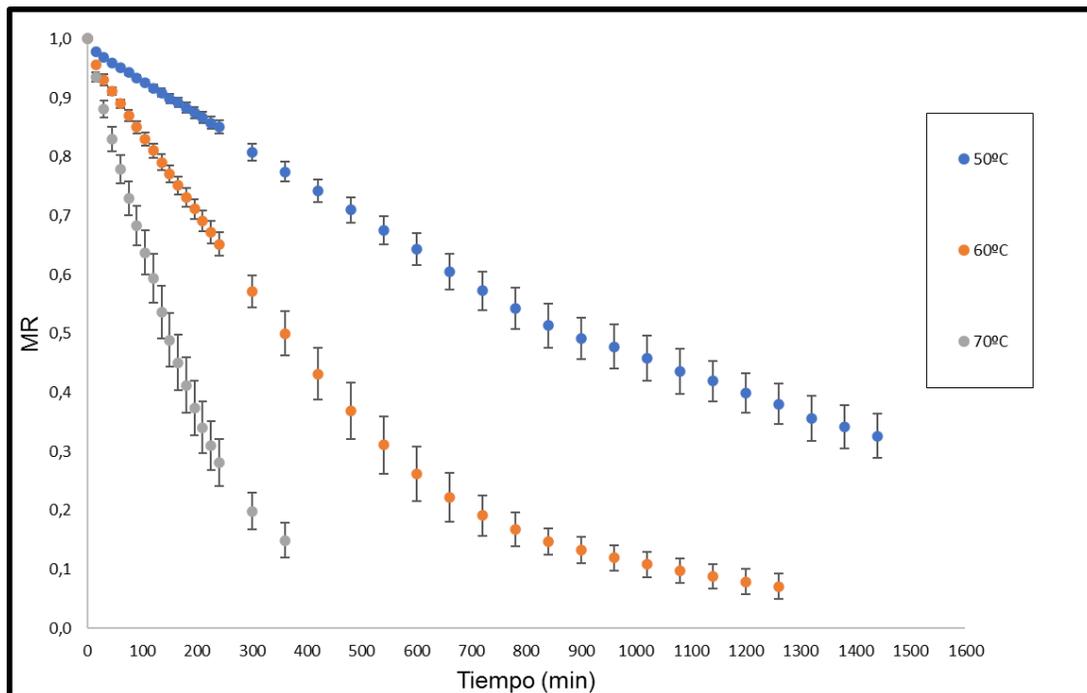


Fig. 20 Comparación de curvas de secado de *Vaccinium Corymbosum* a 50, 60 y 70°C.

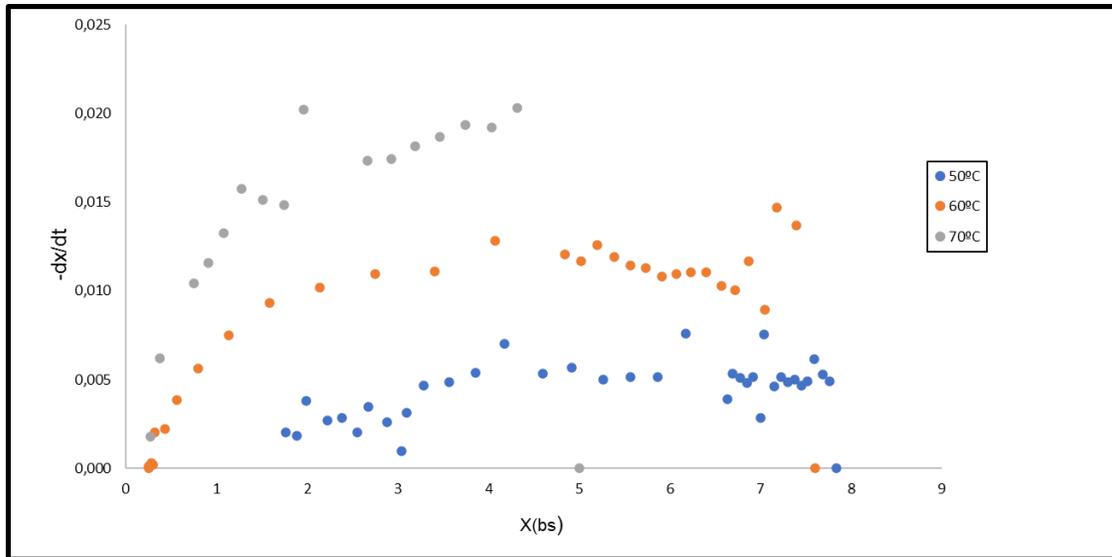


Fig. 21 Comparación de curva de velocidad de secado de *Vaccinium Corymbosum* a 50, 60 y 70°C.

Las figuras 20 y 21 representan el efecto de la temperatura sobre la cinética de secado del *Vaccinium Corymbosum*. Las curvas de secado mostraron un comportamiento exponencial junto a un unico periodo de velocidad decreciente, lo que se considera típico en arándanos. (Vega *et al.*, 2009)

Los graficos indicaron que temperaturas mas altas dieron como resultado una velocidad de secado mas rapida, lo que era de esperar para un proceso de secado por aire convectivo. Los arándanos tienen en su piel una cobertura cerosa con punto de fusión de 55°C (Bernard, 2002). Temperaturas superiores a dicho punto de fusión, deberían presentar velocidades de secado mayores al romper con mayor facilidad dicha cobertura. El menor tiempo de secado (360 min) se obtuvo a 70°C en comparacion con el secado a 60 y 50°C, que requirieron 1260 y 1440 minutos respectivamente. Se presentaron diferencias significativas entre las curvas de secado, indicando que la temperatura afecta la cinetica de secado del arandano. Mediante la prueba de rangos multiples se aprecio que la mayor diferencia entre curvas fue a 50 y 60°C.

6.3. Efecto de los pretratamientos sobre la cinética de secado.

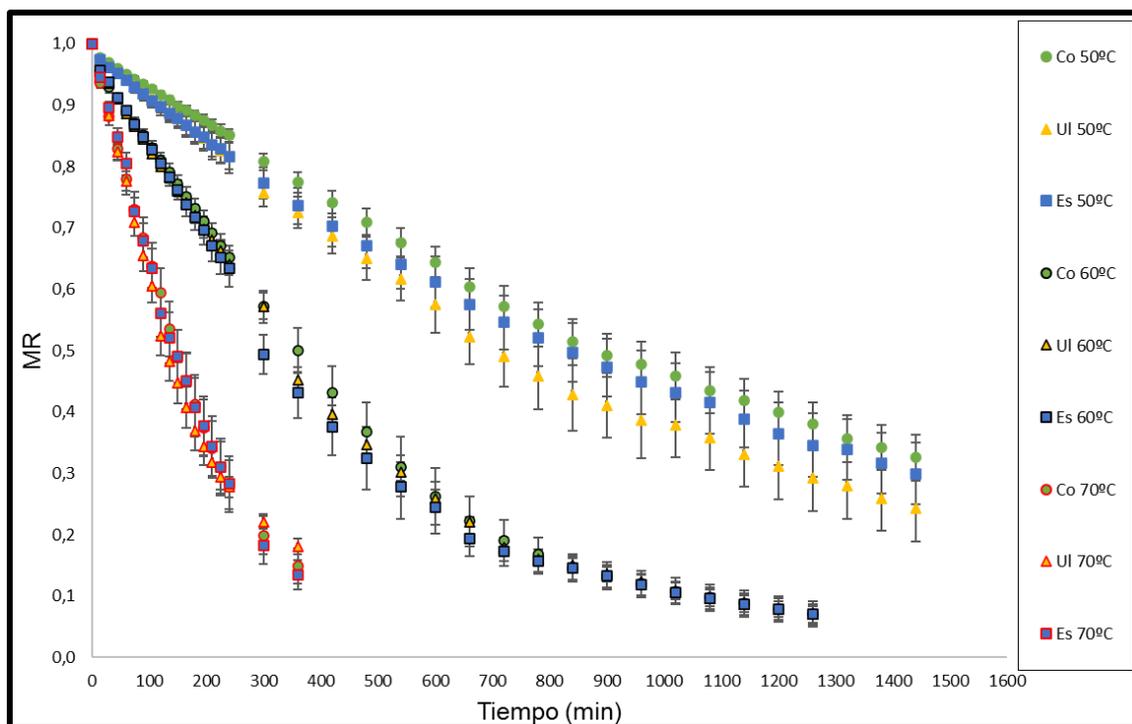


Fig. 22 Efecto de pretratamientos en curva de secado de *Vaccinium Corymbosum* a 50, 60 y 70°C.

La figura 22 presenta las curvas de secado del arándano al aplicar los pretratamientos de escaldado y ultrasonido a 50, 60 y 70°C. En general, se observa que los pretratamientos modificaron la curva de secado del fruto, aumentando la velocidad del proceso y, por ende, disminuyendo el tiempo de secado.

Lo anterior señala que los pretratamientos influyeron en la permeabilidad de la membrana celular del fruto, lo que tuvo como efecto un aumento de la difusividad del agua. Según estas curvas de secado, todas las muestras que recibieron escaldado en todas las temperaturas aumentaron la velocidad de secado respecto a la muestra control. Por otro lado, los frutos tratados con ultrasonido presentaron un comportamiento inversamente proporcional, pues a mayor temperatura se observó una menor velocidad de secado en relación a la muestra control. A pesar de lo anterior, el análisis de la varianza indicó que no existen diferencias significativas en la pérdida de humedad para ningún pretratamiento en las 3 temperaturas estudiadas.

La modificación en la curva de secado de los frutos escaldados, puede deberse al aumento en la difusividad del alimento, por la formación de rupturas en la piel del arándano que facilitan la migración de humedad, tal y como menciona Ando *et al.* (2016). El comportamiento de las muestras tratadas por ultrasonido puede deberse a lo observado por Fructuoso (2018), donde menciona que el efecto del ultrasonido se hace más evidente mientras más resistencia exista durante un proceso de transferencia de masa. A medida que aumenta la temperatura de secado, se produce una menor resistencia en la transferencia de calor y masa, y por lo tanto el efecto del ultrasonido se vuelve menos apreciable.

6.4. Modelamiento de la cinetica de secado

Tabla 8. Parámetros cinéticos y empíricos de los modelos seleccionados a 50°C

| Modelo | Tratamiento | Parámetros cinéticos y empíricos | | | |
|-------------|-------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| | | K (min ⁻¹) | n | a | C |
| Newton | Control | 0,00076+0,00007 ^a | | | |
| | Ultrasonido | 0,00095+0,00013 ^a | | | |
| | Escaldado | 0,00083+0,00011 ^a | | | |
| Page | Control | 0,00054+0,00001 ^a | 1,0565+0,00919 ^a | | |
| | Ultrasonido | 0,00064+0,00001 ^a | 1,05866+0,01975 ^a | | |
| | Escaldado | 0,00096+0,00016 ^b | 0,97953+0,00612 ^b | | |
| H-P | Control | 0,00077+0,00007 ^a | | 1,00633+0,00251 ^a | |
| | Ultrasonido | 0,00097+0,00014 ^a | | 1,00933+0,0045 ^a | |
| | Escaldado | 0,00082+0,00011 ^a | | 0,99163+0,00195 ^b | |
| Logaritmico | Control | 0,00063+0,00006 ^a | | 1,14133+0,01011 ^a | -0,14153+0,01159 ^a |
| | Ultrasonido | 0,00083+0,00001 ^a | | 1,09966+0,01721 ^b | -0,09777+0,01583 ^b |
| | Escaldado | 0,00078+0,00011 ^a | | 1,023+0,01558 ^c | -0,03356+0,01412 ^c |

Valores con distinta letra en la misma columna indican diferencias significativas (p<0,05)

Tabla 9. Parámetros cinéticos y empíricos de los modelos seleccionados a 60°C

| Modelo | Tratamiento | Parámetros cinéticos y empíricos | | | |
|-------------|-------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| | | K (min ⁻¹) | n | a | C |
| Newton | Control | 0,00203+0,00017 ^a | | | |
| | Ultrasonido | 0,00209+0,00008 ^a | | | |
| | Escaldado | 0,00217+0,00019 ^a | | | |
| Page | Control | 0,00091+0,00002 ^a | 1,131+0,01931 ^a | | |
| | Ultrasonido | 0,00111+0,00006 ^b | 1,10433+0,00152 ^a | | |
| | Escaldado | 0,00108+0,00003 ^b | 1,11566+0,01457 ^a | | |
| H-P | Control | 0,00212+0,00019 ^a | | 1,02866+0,00404 ^a | |
| | Ultrasonido | 0,00216+0,00009 ^a | | 1,025+0,00001 ^a | |
| | Escaldado | 0,00228+0,00021 ^a | | 1,033+0,00556 ^a | |
| Logaritmico | Control | 0,00184+0,00018 ^a | | 1,079+0,003 ^a | -0,06502+0,00589 ^a |
| | Ultrasonido | 0,00199+0,00006 ^a | | 1,053+0,001 ^b | -0,03726+0,0026 ^b |
| | Escaldado | 0,00219+0,00024 ^a | | 1,045+0,00264 ^c | -0,01737+0,00789 ^c |

Valores con distinta letra en la misma columna indican diferencias significativas (p<0,05)

Tabla 10. Parámetros cinéticos y empíricos de los modelos seleccionados a 70°C

| Modelo | Tratamiento | Parámetros cinéticos y empíricos | | | |
|-------------|-------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| | | K (min ⁻¹) | n | a | C |
| Newton | Control | 0,00484+0,00056 ^a | | | |
| | Ultrasonido | 0,00518+0,00038 ^a | | | |
| | Escaldado | 0,00488+0,00053 ^a | | | |
| Page | Control | 0,00205+0,00043 ^a | 1,17033+0,01858 ^a | | |
| | Ultrasonido | 0,00324+0,0005 ^b | 1,09366+0,01616 ^b | | |
| | Escaldado | 0,0017+0,00015 ^a | 1,20666+0,00814 ^b | | |
| H-P | Control | 0,00508+0,00056 ^a | | 1,034+0,00173 ^a | |
| | Ultrasonido | 0,00541+0,00038 ^a | | 1,0323+0,00057 ^a | |
| | Escaldado | 0,00521+0,00058 ^a | | 1,0473+0,0045 ^b | |
| Logaritmico | Control | 0,00379+0,00072 ^a | | 1,212+0,07332 ^a | -0,19796+0,07424 ^a |
| | Ultrasonido | 0,00489+0,00069 ^a | | 1,046+0,02291 ^b | -0,01551+0,02739 ^b |
| | Escaldado | 0,00381+0,00071 ^a | | 1,23733+0,06573 ^a | -0,21243+0,07244 ^a |

Valores con distinta letra en la misma columna indican diferencias significativas (p<0,05)

Las tabla 8, 9 y 10 muestran los valores de los parámetros cinéticos y empíricos de los modelos seleccionados (tabla 6), a los cuales se ajustaron las curvas de secado. El parámetro cinético K muestra la tendencia de aumentar a medida que se eleva la

temperatura de secado. Resultados similares fueron observados por Omar (2013) y Vega *et al.* (2009).

Mediante el análisis de la varianza, se obtuvieron diferencias significativas denotando el efecto de la temperatura sobre este parámetro cinético. Una prueba de rangos múltiples indicó que la diferencia significativa se produjo entre todas las temperaturas.

Los parámetros empíricos n , a y c de los modelos de secado de Page, Henderson-Pabis y Logaritmico aumentaron de valor a medida que se elevó la temperatura. Se presentaron diferencias significativas entre las constantes por efecto de la temperatura. Normalmente estos coeficientes son más dependientes de factores como la estructura del tejido del alimento, la velocidad de aire de secado o el contenido de humedad inicial, tal y como lo menciona Azzouz *et al.* (2002), que estudio el comportamiento de estas constantes en uvas deshidratadas.

Por otro lado, al mencionar el efecto de los pretratamientos sobre los parámetros cinéticos y empíricos. En general, no se observaron diferencias significativas para la constante cinética K , solo en el modelo de Page los pretratamientos mostraron efecto, aunque no de forma consistente en las 3 temperaturas para poder afirmar que el escaldado o ultrasonido produjeron un efecto significativo.

Los parámetros empíricos de las muestras a las que se aplicó pretratamiento tendieron a disminuir de valor respecto a la muestra control. Se observaron diferencias significativas entre tratamientos, señalando para las constantes n y a de los modelos de Page y Henderson-Pabis, que el tratamiento de escaldado produjo la disminución más importante. En cuanto al modelo Logaritmico, el escaldado y ultrasonido generaron una disminución significativa respecto a la muestra control en los parámetros a y c .

Tabla 11. Pruebas estadísticas para los modelos de secado a 50°C.

| Modelo | Tratamiento | Estadístico Matemático | | | |
|-------------|-------------|------------------------|------------|------------|----------------|
| | | SSE | RMSE | χ^2 | R ² |
| Newton | Control | 8,9116E-05 | 0,00944015 | 9,1592E-05 | 0,9981 |
| | Ultrasonido | 0,00014721 | 0,01213292 | 0,0001513 | 0,9975 |
| | Escaldado | 3,8075E-05 | 0,00617046 | 3,9132E-05 | 0,9993 |
| Page | Control | 0,00019671 | 0,01402543 | 0,00020795 | 0,9990 |
| | Ultrasonido | 7,5962E-05 | 0,00871564 | 8,0303E-05 | 0,9988 |
| | Escaldado | 2,9539E-05 | 0,00543497 | 3,1227E-05 | 0,9995 |
| H-P | Control | 7,7843E-05 | 0,00882287 | 8,2291E-05 | 0,9983 |
| | Ultrasonido | 0,00012602 | 0,01122577 | 0,00013322 | 0,9979 |
| | Escaldado | 1,4143E-05 | 0,00376073 | 1,4951E-05 | 0,9997 |
| Logaritmico | Control | 5,3323E-05 | 0,00730228 | 5,8028E-05 | 0,9989 |
| | Ultrasonido | 9,4377E-05 | 0,00971478 | 0,0001027 | 0,9985 |
| | Escaldado | 1,472E-05 | 0,00383672 | 1,6019E-05 | 0,9998 |

Tabla 12. Pruebas estadísticas para los modelos de secado a 60°C.

| Modelo | Tratamiento | Estadístico Matemático | | | |
|-------------|-------------|------------------------|------------|------------|----------------|
| | | SSE | RMSE | χ^2 | R ² |
| Newton | Control | 0,00068626 | 0,02619655 | 0,00070705 | 0,9929 |
| | Ultrasonido | 0,00056378 | 0,02374411 | 0,00058087 | 0,9944 |
| | Escaldado | 0,0007296 | 0,02701111 | 0,00075171 | 0,9926 |
| Page | Control | 0,00019514 | 0,01396911 | 0,00020733 | 0,9979 |
| | Ultrasonido | 0,00022675 | 0,01505808 | 0,00024092 | 0,9977 |
| | Escaldado | 0,0003521 | 0,01876431 | 0,00037411 | 0,9965 |
| H-P | Control | 0,00052905 | 0,02300119 | 0,00056212 | 0,9945 |
| | Ultrasonido | 0,00044346 | 0,02105857 | 0,00047118 | 0,9955 |
| | Escaldado | 0,00053893 | 0,02321495 | 0,00057262 | 0,9945 |
| Logaritmico | Control | 0,00038331 | 0,01957841 | 0,00042041 | 0,9960 |
| | Ultrasonido | 0,00038248 | 0,01955712 | 0,0004195 | 0,9961 |
| | Escaldado | 0,00052884 | 0,02299662 | 0,00058002 | 0,9947 |

Tabla 13. Pruebas estadísticas para los modelos de secado a 70°C.

| Modelo | Tratamiento | Estadístico Matemático | | | |
|-------------|-------------|------------------------|------------|------------|----------------|
| | | SSE | RMSE | χ^2 | R ² |
| Newton | Control | 0,00060391 | 0,02457462 | 0,00063746 | 0,9896 |
| | Ultrasonido | 0,00050924 | 0,02256626 | 0,00053753 | 0,9915 |
| | Escaldado | 0,00083724 | 0,02893507 | 0,00088375 | 0,9864 |
| Page | Control | 9,7844E-05 | 0,00989162 | 0,00010936 | 0,9986 |
| | Ultrasonido | 0,00033579 | 0,01832462 | 0,0003753 | 0,9945 |
| | Escaldado | 5,9354E-05 | 0,00770416 | 6,6337E-05 | 0,9990 |
| H-P | Control | 0,00041806 | 0,02044647 | 0,00046724 | 0,9928 |
| | Ultrasonido | 0,0003516 | 0,01875098 | 0,00039296 | 0,9941 |
| | Escaldado | 0,00047835 | 0,02187132 | 0,00053463 | 0,9921 |
| Logaritmico | Control | 0,00020969 | 0,01448054 | 0,000249 | 0,9970 |
| | Ultrasonido | 0,00086079 | 0,02933929 | 0,00102219 | 0,9942 |
| | Escaldado | 0,00021781 | 0,01475852 | 0,00025865 | 0,9970 |

Las tablas 11, 12 y 13 muestran los valores de los estadísticos matemáticos para los modelos seleccionados. En general, los modelos presentaron un buen ajuste de datos con valores altos de R^2 (>0,98) y cercanos a cero para SSE, RMSE y X^2 .

El modelo de Page presento el mejor ajuste a la curva de secado del arandano de forma consistente en las 3 temperaturas de trabajo utilizadas. Por el contrario, el modelo de Newton obtuvo el peor ajuste. Otros autores tambien han indicado al modelo de Page como adecuado para predecir la humedad del arandano. (Aguirre & Miano, 2021; Omar, 2013)

Con base a lo anterior, se utilizo el modelo de Page para comparar los datos de humedad experimental y predicha del arandano a distintos pretratamientos y temperaturas (Fig. 23). En general, la prediccion mostro valores en concordancia con la linea recta, denotando la competencia del modelo de Page para representar las propiedades de secado del arandano.

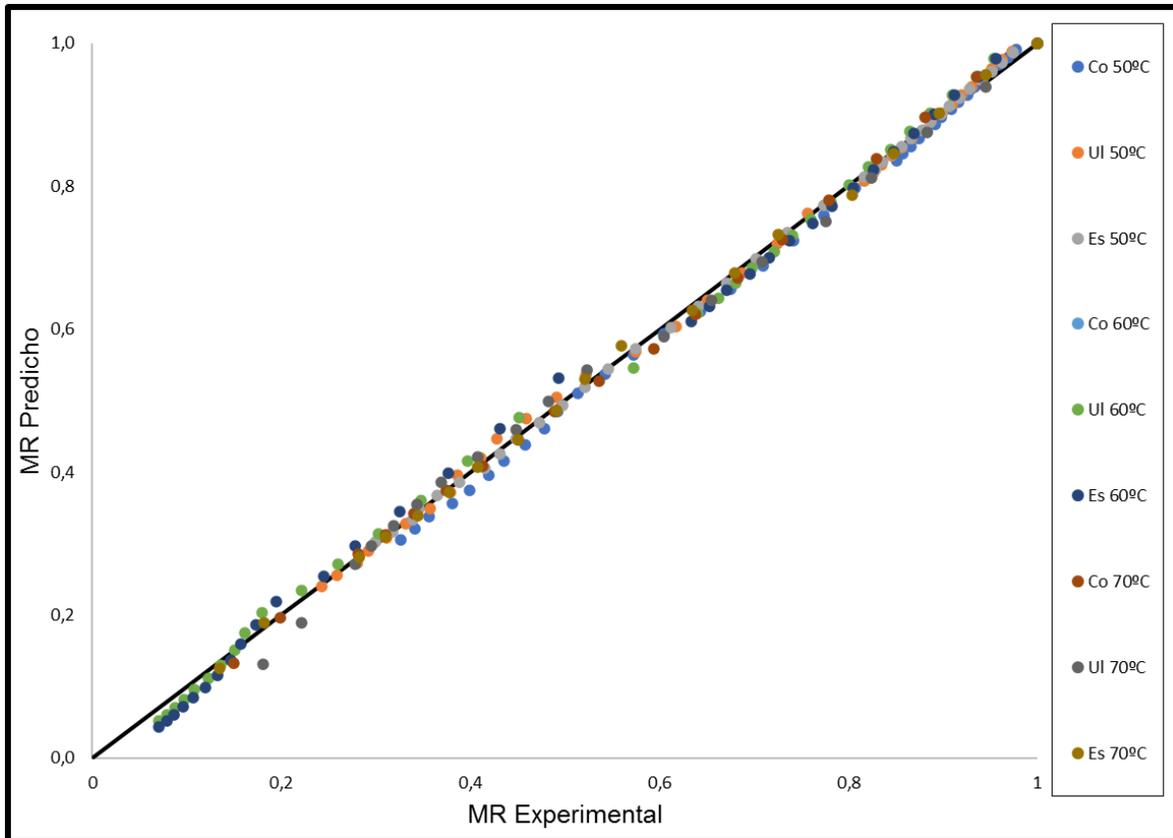


Fig. 23 Comparacion entre tasa de perdida de humedad (MR) experimental y predicha a distintas temperaturas y pretratamientos para el modelo de Page.

6.5. Determinación de difusividad efectiva y energía de activación

Tabla 14. Difusividad efectiva del arandando a 50, 60 y 70°C, en función de los pretratamientos.

| T(°C) | $D_{ef} \times 10^{-10} (m^2/s)$ | | | | | |
|-------|----------------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------|
| | Control | R ² | ultrasonido | R ² | Escaldado | R ² |
| 50 | 9,72±2,45 ^a | 0,9988 | 11,01±3,36 ^a | 0,9984 | 9,77±2,44 ^a | 0,9996 |
| 60 | 30,31±1,86 ^b | 0,9958 | 26,49±2,92 ^b | 0,9957 | 28,05±3,31 ^b | 0,9928 |
| 70 | 50,41±5,31 ^b | 0,9945 | 44,65±7,13 ^c | 0,9873 | 53,15±7,84 ^c | 0,9924 |

Valores con distinta letra en la misma columna indican diferencias significativas (p<0,05)

La tabla 14 muestra el valor promedio de las difusividades efectivas del arandano a distintas temperaturas y pretratamientos. El mínimo valor de difusividad obtenido fue de $9,72 \pm 2,45 \times 10^{-10}$ mientras que el máximo fue $5,32 \pm 0,78 \times 10^{-9}$. Generalmente, la difusividad efectiva varía en rangos de 10^{-11} a 10^{-9} para alimentos secados por métodos convencionales. (Arslan y Özcan, 2011).

Se obtuvieron resultados mayores a los reportados en arandanos por autores como Zielinska y Michalska (2016); Malleret *et al.* (2020) y Vega *et al.* (2011). Lo anterior puede ser consecuencia de la metodología utilizada en el trabajo. Para determinar el volumen de los arandanos durante el proceso de secado se utilizó el desplazamiento de sólidos, empleando semillas de amapolla. El roce de las semillas con el fruto a lo largo de las mediciones provocaría un daño ligero pero acumulativo en la piel del arandano, alterando así, su capacidad de transferencia de humedad.

Los valores de difusividad efectiva aumentaron a medida que se incrementa la temperatura de secado. Mediante una prueba ANOVA, se observaron diferencias significativas denotando el efecto de la temperatura sobre la difusividad, una prueba de rangos múltiples señaló que la diferencia se produjo en general entre todas las temperaturas.

Un aumento en la temperatura causa una reducción en la viscosidad del agua y mejora la actividad de las moléculas de agua. Esto se puede atribuir al hecho de que, a una temperatura más alta, las moléculas de agua están unidas a la matriz de alimentos, por lo tanto, requieren menos energía para eliminarse que a una temperatura más baja (Alara *et al.*, 2017).

No se presentaron diferencias significativas en la difusividad por efecto de los pretratamientos a ninguna temperatura.

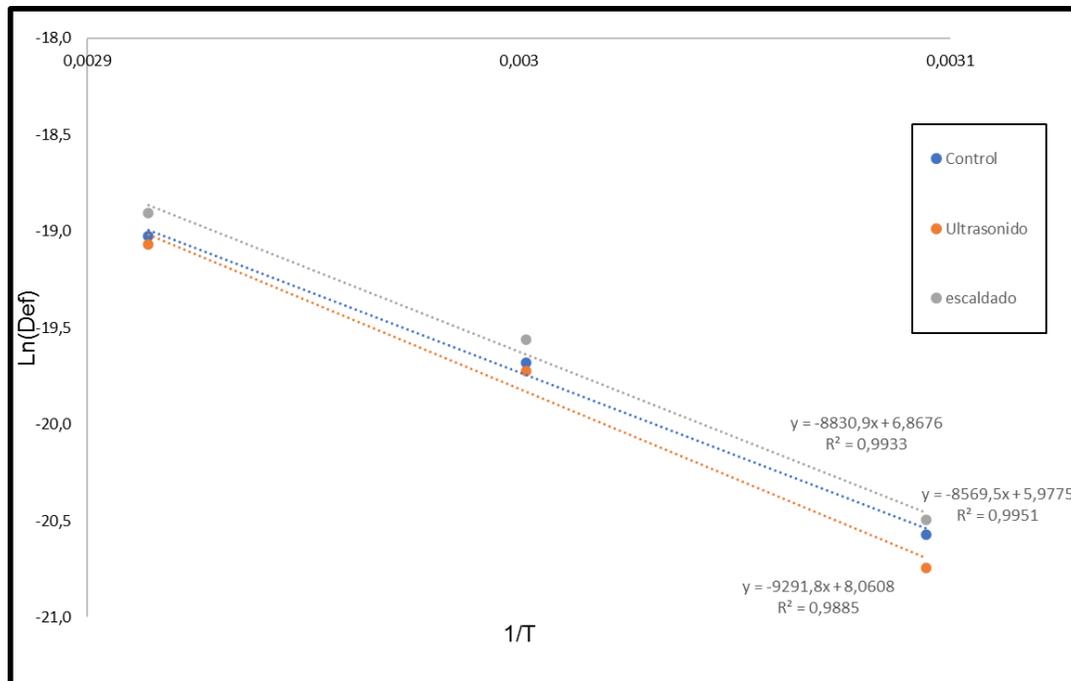


Fig. 24 Relacion de tipo Arrhenius entre la difusividad efectiva y la temperatura de secado

La energía de activación (E_a) fue calculada mediante la gráfica del $\ln(D_{ef})$ en función de la inversa de la temperatura (Fig. 24), obteniendo valores de $77,0 \pm 7,8$ kJ/mol; $76,7 \pm 0,7$ kJ/mol y $78,8 \pm 4,7$ kJ/mol para los tratamientos control, ultrasonido y escaldado, respectivamente. Estos valores se encuentran dentro del rango general para materiales alimenticios de 12,7 - 110,0 kJ/mol. (Zogzas *et al.*, 1996)

Los datos obtenidos en este trabajo son superiores a los reportados en arándanos por Vega *et al.* (2009), siendo más similares a los presentados para tomillo 77,16 kJ/mol (Da Rocha *et al.*, 2012) y menta 82,93 kJ/mol (Park *et al.*, 2002). Darvishi *et al.* (2013) resalta que valores altos de energía de activación indican una menor sensibilidad de la difusividad efectiva a la temperatura.

No se observó gran diferencia en energía de activación entre los tratamientos, indicando que el escaldado y ultrasonido no afectan mayormente los requerimientos energéticos del proceso.

6.6. Caracterización física del arándano

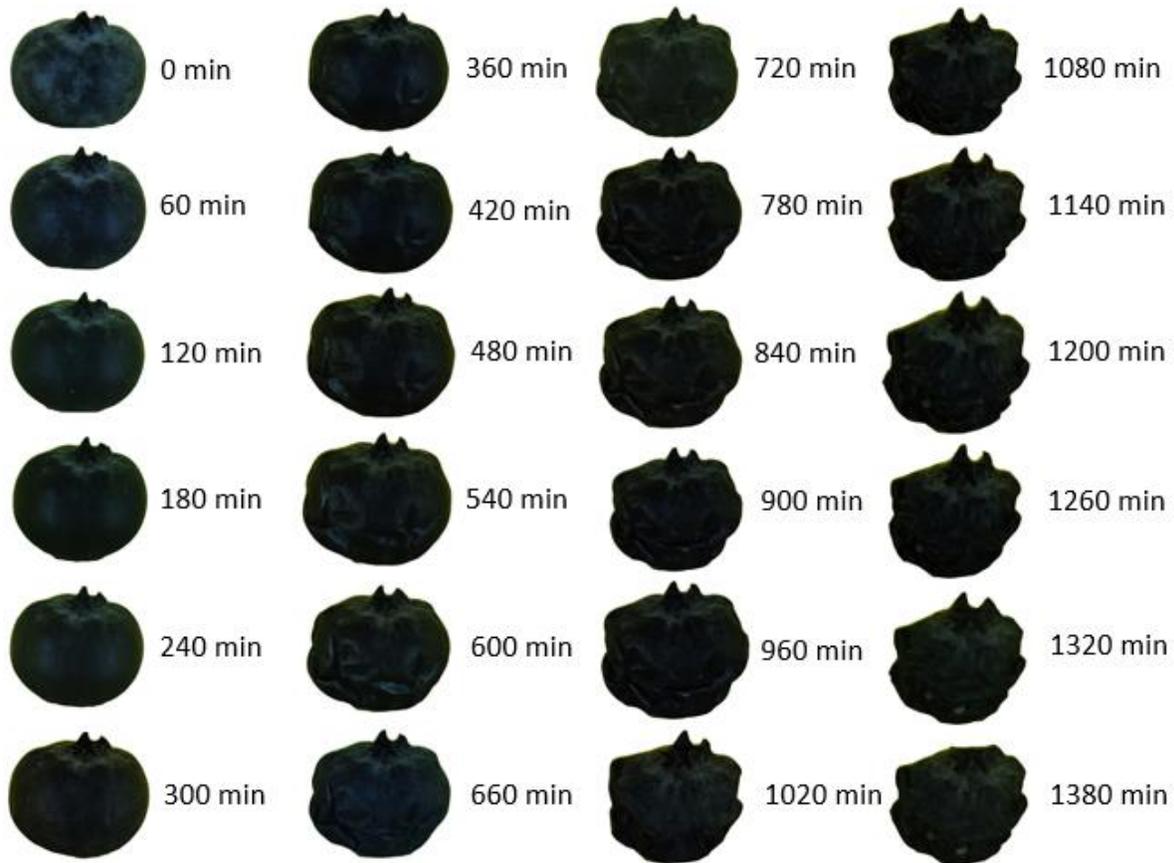


Fig. 25 Cambios físicos sufridos en el arándano durante secado a 50°C.

La figura 25 muestra el comportamiento general que presentaron los arándanos durante el proceso de secado. Durante las fases iniciales, el fruto tendió a dilatarse aumentando ligeramente su diámetro ecuatorial, pero manteniendo su geometría original (0 a 240 min). La causa de la dilatación fue atribuido a la generación de vapor, el cual quedó atrapado al interior del arándano.

A medida que avanzaba el secado, el comportamiento del diámetro se revirtió, reduciéndose a un tamaño inferior al original. Además, se comenzaron a producir tensiones en la estructura del fruto, lo que se evidencio en la formación de arrugas, características típicas de alimentos tipo pasa. El encogimiento del fruto no fue homogéneo durante el deshidratado.

En cuanto a color, visiblemente es posible apreciar que el fruto tiende a oscurecerse (pérdida de luminosidad), mas no se observa un viraje a otras tonalidades de color, lo que puede dar a entender que el fruto no sufrió degradación importante de sus pigmentos (antocianinas).

6.6.1. Variación de volumen

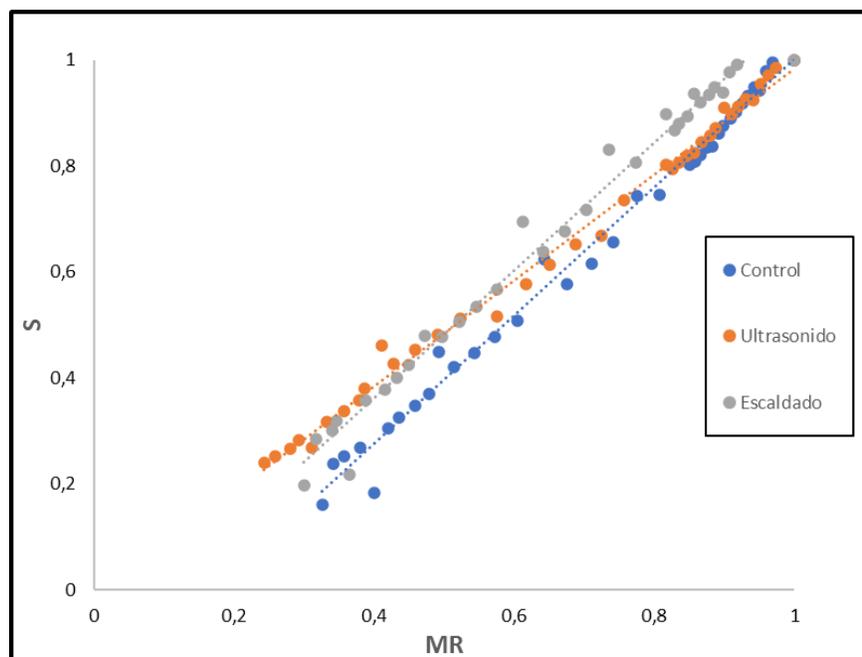


Fig. 26 Encogimiento de arándano a 50°C

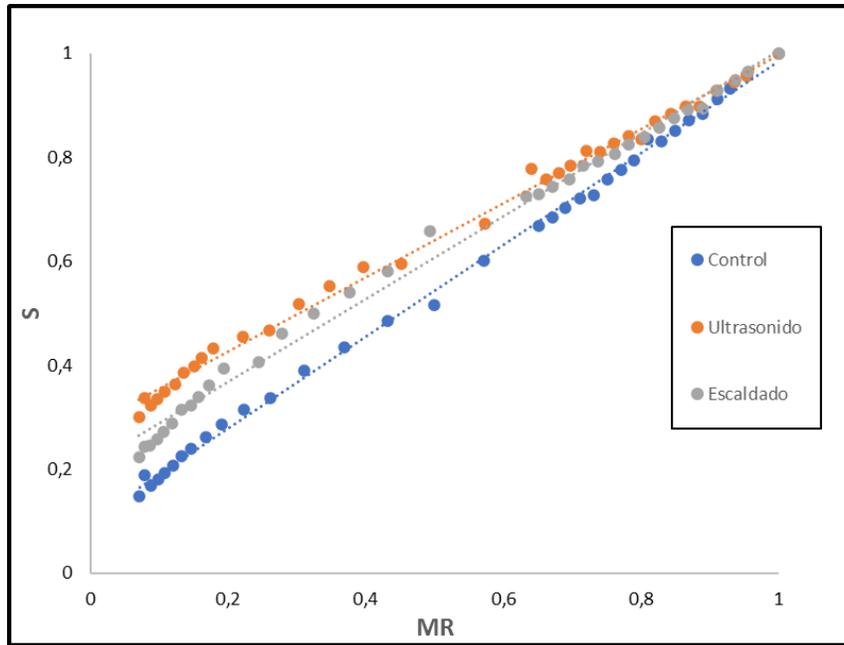


Fig. 27 Encogimiento de arándano a 60°C

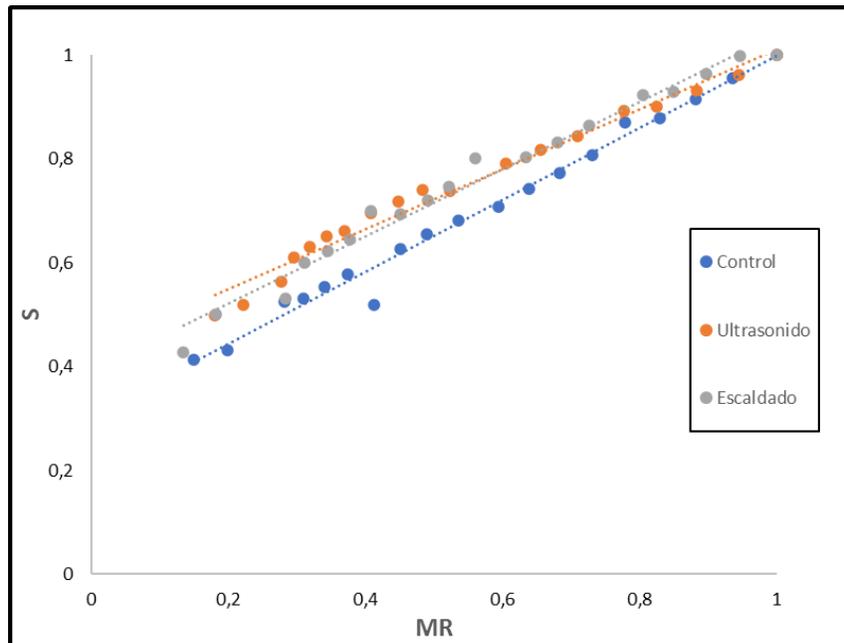


Fig. 28 Encogimiento de arándano a 70°C

Las figuras 26, 27 y 28 representan el cambio volumétrico (S) del arándano en función de la tasa de humedad (MR) a distintas temperaturas.

En general, se observa que el encogimiento del arándano a 50, 60 y 70°C es cercano a un comportamiento lineal, pues a medida que disminuye la tasa de humedad (MR) también lo hace el coeficiente de encogimiento (S). Resultados similares han sido descritos en uvas deshidratadas, membrillo y manzana. (Azzouz *et al.* (2002); Banu *et al.* (2008) y Moreira *et al.* (2000))

Tabla 15. Encogimiento en arándanos tratados con distintos pretratamientos

| T°C | Encogimiento (%) | | |
|-----|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| | Control | Ultrasonido | Escaldado |
| 50 | 83,95±1,43 ^a | 75,98±7,71 ^a | 80,24±5,81 ^a |
| 60 | 85,21±8,75 ^a | 70,04±3,53 ^a | 77,7±8,48 ^a |
| 70 | 58,71±6,94 ^a | 50,1±3,75 ^a | 57,21±13,05 ^a |

Valores con distinta letra en la misma columna indican diferencias significativas (p<0,05)

La tabla 15 muestra el encogimiento porcentual de los arándanos a distintas temperaturas y pretratamientos. La contracción del fruto oscilo entre valores de 50,1±3,75 y 85,21±8,75%. Las muestras que recibieron pretratamiento presentaron menores niveles de encogimiento respecto a las muestras control. Esta tendencia de resultados fue similar a lo observado por Fengying *et al.* (2021), al comparar las propiedades de los arándanos aplicando distintos pretratamientos. Lo anterior indicaría que suministrar pretratamientos en un proceso de secado, ayudaría a mejorar la capacidad de transporte de humedad del fruto, disminuyendo el grado de contracción de las muestras.

Entre los pretratamientos, las muestras que recibieron ultrasonido conservaron mejor el volumen original del fruto. Guo *et al.* (2020), observó que el tratamiento de ultrasonido además de cambiar la estructura interna en tejido vegetal, también destruye las paredes celulares en frutos aumentando la tasa de transporte de agua, reduciendo así, la deformación del alimento en un proceso de secado.

En cuanto al efecto de la temperatura, como tendencia se observa que a medida que aumenta la temperatura disminuye la contracción en los arándanos. Estos resultados son opuestos a lo esperado. Mayor y Sereno (2004), mencionan que la contracción de tejido vegetal durante un proceso de secado es causada por el desequilibrio entre presiones internas y externas. Mientras más rápido se elimine agua, mayor gradiente de humedad y, por ende, un encogimiento más extenso.

Los valores bajos de encogimiento a 70°C, pueden indicar que los arándanos aún tienen espacio de pérdida de agua (Fig. 20), en lugar de que las altas temperaturas disminuyen la contracción.

6.6.2. Variación de color

Los valores L^* , a^* y b^* para el arándano fresco fueron: $13,46 \pm 1,95$, $-4,62 \pm 0,72$ y $-3,36 \pm 2,81$. Se obtuvieron valores inferiores de luminosidad (L^*) respecto a lo reportado por otros autores, donde esta coordenada cromática frecuenta valores entre 20-25. (Mahrukh and Ilknur (2021); Melchor (2018) y Fengying *et al.* (2021))

Lo anterior se atribuye a la técnica utilizada para medir las coordenadas cromáticas, pues no es lo mismo utilizar un colorímetro para medir color, respecto a realizar análisis de imagen digital para obtener dicho atributo. Observaciones similares fueron reportadas por otros autores en análisis de imagen digital (Chen & Martynenko, 2013)

Tabla 16. Diferencia de componentes cromáticos (L^* , a^* y b^*) y diferencia global de color (ΔE) en arándano a distintas temperaturas y pretratamientos

| T (°C) | Tratamiento | ΔL^* | Δa^* | Δb^* | ΔE |
|--------|-------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| 50 | Control | -0,83±0,1 ^a | 0,38±0,47 ^a | 1,06±0,19 ^a | 1,45±0,22 ^a |
| | Ultrasonido | -1,41±0,22 ^a | 1,02±0,44 ^b | 1,4±0,26 ^a | 2,28±0,24 ^a |
| | Escaldado | -0,75±0,14 ^a | 0,88±0,32 ^{ab} | 1,44±0,05 ^a | 1,87±0,19 ^a |
| 60 | Control | -0,73±0,03 ^a | 0,58±0,37 ^a | 0,48±0,44 ^a | 1,11±0,37 ^a |
| | Ultrasonido | -1,33±0,13 ^a | 1,27±0,51 ^b | 0,92±0,33 ^a | 2,09±0,46 ^a |
| | Escaldado | -0,95±0,12 ^a | 1,13±0,24 ^{ab} | 0,9±0,32 ^a | 1,75±0,2 ^a |
| 70 | Control | -0,78±0,13 ^a | 0,54±0,39 ^a | 0,64±0,37 ^a | 1,2±0,36 ^a |
| | Ultrasonido | -1,32±0,2 ^a | 1,04±0,27 ^a | 1,13±0,55 ^a | 2,08±0,25 ^a |
| | Escaldado | -0,89±0,13 ^a | 0,82±0,24 ^a | 1,07±0,48 ^a | 1,67±0,22 ^a |

Valores con distinta letra en la misma columna indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

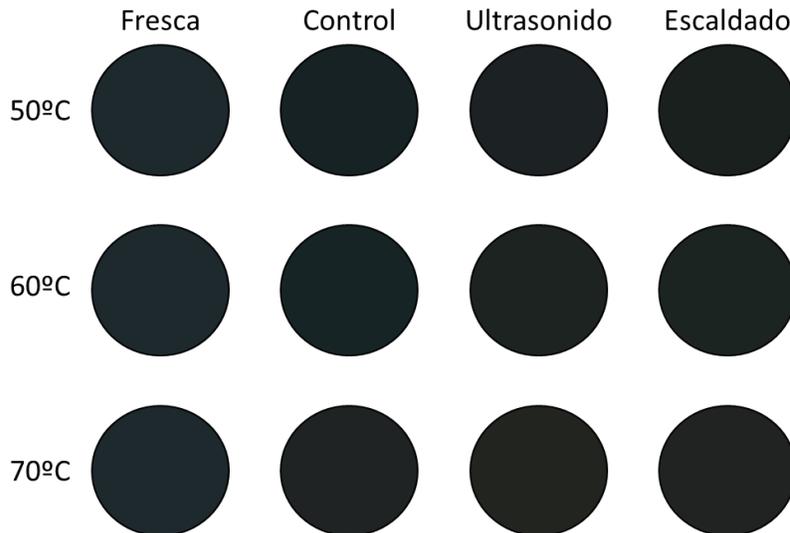


Fig. 29 Color en arándanos a distintas temperaturas y pretratamiento

La tabla 16 y figura 29 muestran la diferencia de los componentes cromáticos L^* , a^* y b^* (cambio de color) a diferentes temperaturas y pretratamientos. Valores negativos en ΔL^* indicaron que el color de los frutos se oscureció durante el proceso de secado, mientras que los valores positivos en Δa^* y Δb^* sugirieron que los

arándanos eran menos azules y más rojos. Los cambios de color en frutas deshidratadas se deben a reacciones de Maillard, la degradación de pigmentos, pardeamiento enzimático, entre otros.

En general, se observa que las muestras tratadas con pretratamientos presentaron mayores valores de ΔL^* , Δa^* y Δb^* respecto a la muestra control. Pese a lo anterior, solo se observaron diferencias significativas en (Δa^*) en las muestras tratadas con ultrasonido a 50 y 60°C. En cuanto al efecto de la temperatura, no se presentaron diferencias significativas en los parámetros ΔL^* , Δa^* y Δb^* .

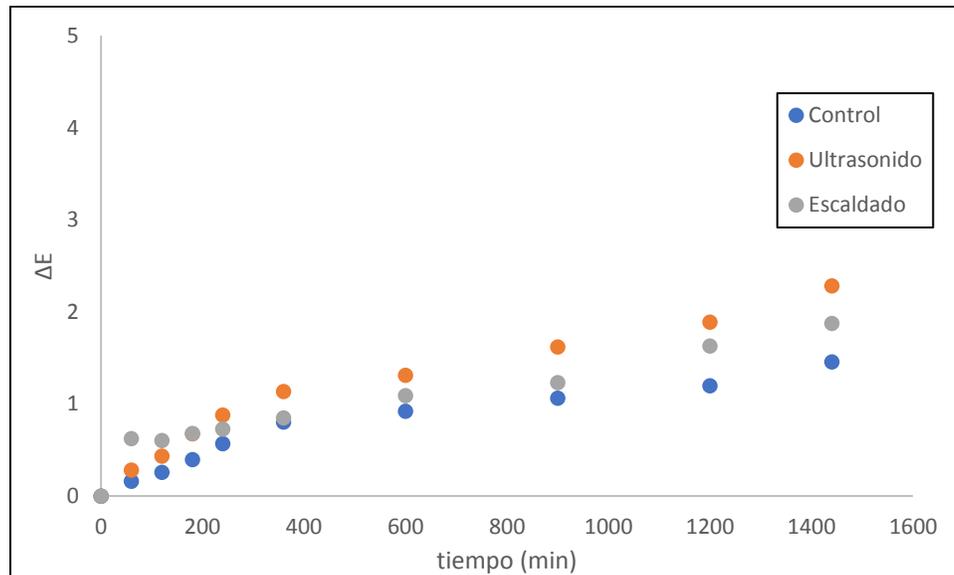


Fig. 30 Diferencia global de color (ΔE) en arándano a 50°C

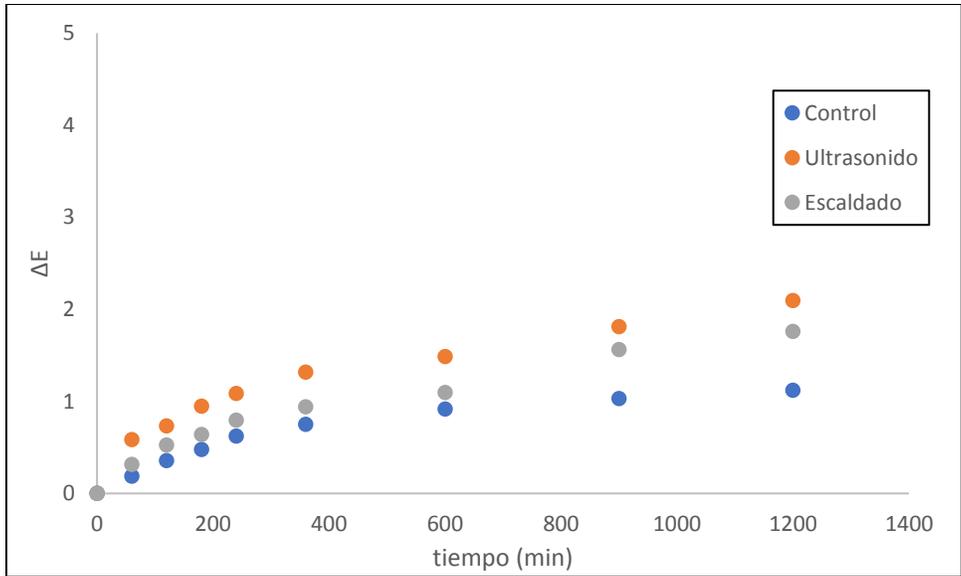


Fig. 31 Diferencia global de color (ΔE) en arándano a 60°C

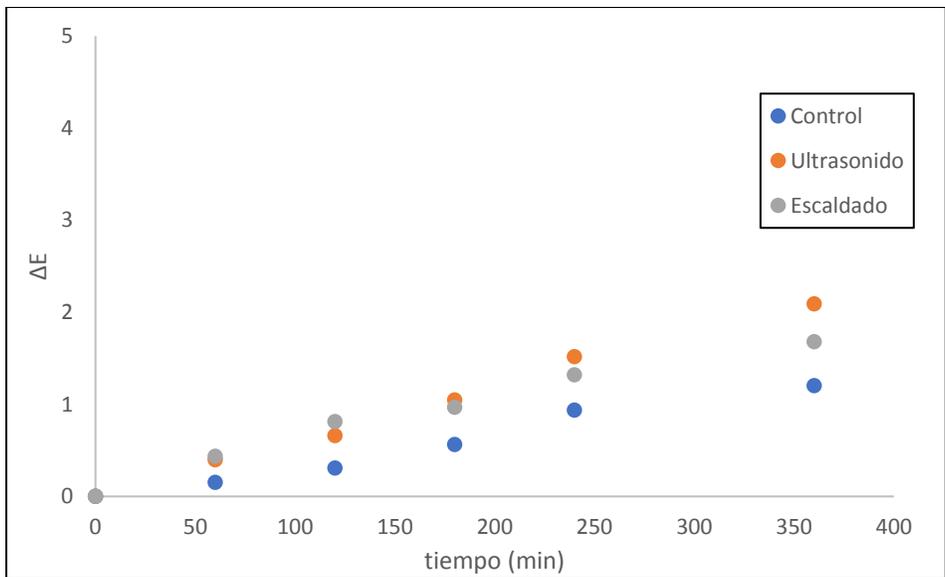


Fig. 32 Diferencia global de color (ΔE) en arándano a 70°C

Las figuras 30, 31 y 32 muestran la diferencia global de color (ΔE) del arándano a distintas temperaturas y pretratamientos. Se observó que los valores de ΔE variaron entre $1,11 \pm 0,37$ y $2,28 \pm 0,24$. Un cambio de color es imperceptible para el ojo humano cuando esta entre $0,0 < \Delta E < 1,5$, se puede apreciar cuando esta entre $1,5 < \Delta E < 5,0$ y resulta evidentemente visible cuando $\Delta E > 5,0$. (Melchor, 2018)

De acuerdo a lo anterior, se estableció que el cambio de color de los arándanos en las distintas temperaturas y pretratamientos utilizados, era ópticamente visible, aunque principalmente por un observador calificado. Resultados similares fueron reportados por otros autores en arándanos y Mortiño. (Melchor (2018); Zielinska y Michalska (2016); Cuatin y Escobar (2019))

En las figuras es posible apreciar que las muestras tratadas con ultrasonido y escaldado obtuvieron una mayor diferencia global de color en comparación con la muestra control. A pesar de esto, no se presentaron diferencias significativas para ΔE entre tratamientos o temperatura.

Como se ha mencionado anteriormente, las antocianinas son los pigmentos responsables de dar color a los arándanos. De acuerdo a estos resultados, los arándanos secados bajo las condiciones establecidas en este trabajo mantienen en general su color, pudiendo indicar que no hay pérdida significativa de sus pigmentos. Mahrukh and Ilknur (2021), observaron en secado convectivo de arándanos a 50, 70 y 90°C que el fruto presento parámetros de color cercanos al arándano fresco.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió el efecto de 2 pretratamientos sobre la cinética de secado y propiedades físicas (volumen y color) en arándano (*Vaccinium Corymbosum*) a 50, 60 y 70°C.

El incremento en la temperatura de secado provocó un aumento en la velocidad de secado de las muestras con y sin pretratamiento. En general ninguno de los pretratamientos presentó efectos importantes en la cinética de secado del fruto.

Se modelizó la cinética de secado utilizando los modelos de Newton, Page, Henderson-Pabis y Logarítmico, siendo el modelo de Page el que obtuvo mejores ajustes.

En cuanto a los parámetros de calidad, el fruto mostro un encogimiento de tipo lineal señalando que los pretratamientos disminuyen la contracción en el proceso de secado, aunque no de manera significativa. En lo referente a color, las muestras secas se señalan más oscuras y menos azules que el fruto fresco. Pese a eso, la diferencia global de color indico que no existió una diferencia importante en color.

En general, se observó a lo largo del trabajo que la temperatura presento mayor influencia que los pretratamientos. Para futuros estudios se sugiere aumentar la intensidad tratamientos en busca de mejores resultados.

8. BIBLIOGRAFIA

- AGROCELER. (2021). Producción mundial de arándanos: desafíos en eficiencia, abastecimiento y alta calidad. [en línea] < <https://www.agroceler.cl/2021/10/12/produccion-mundial-de-arandanos-desafios-en-eficiencia-abastecimiento-y-alta-calidad/>> [consulta: 8 de abril de 2022].
- Aguirre, M. y Miano, P. 2021. Acelerando la deshidratación de Arándanos (*Vaccinium Corymbosum*) empleando el efecto de Marangoni. DOI: [10.18687/LACCEI2021.1.1.29](https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.29)
- Alara, O. R., Abdurahman, N. H., y Olalere, O. A. (2017). Mathematical modelling and morphological properties of thin layer oven drying of Vernonia amygdalina leaves. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2017.09.003>
- Ando, Y., Maeda, Y., Mizutani, K., Wakatsuki, N., Hagiwara, S. y Nabetani, H. (2016). *Impact of blanching and freeze-thaw pretreatment on drying rate of carrot roots in relation to changes in cell membrane function and cell Wall structure*. *LWT – Food Science and Technology*, 71, pp. 40-46.
- Arslan, D., y Özcan, M. M. (2011). Dehydration of red bell-pepper (*Capsicum annuum* L.): Change in drying behavior, colour and antioxidant content. *Food and Bioproducts Processing*, 89(4), 504-513. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.09.009>
- Azzouz, S.; Guisan, A.; Jomaa, W. y Belghith, A. (2002). Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, 55: 323-330.
- B. Koç, I. Eren, F.K. Ertekin. Modelling bulk density and shrinkage of quince during drying: the effect of drying method. *J. Food Eng.*, 85 (2008), pp. 340-349
- Banu, K., Ismail, E. y Figen, E. Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering* 85 (2008) 340-349

- Bello, J. (2003). “La ciencia de los alimentos saludables: ¿una rama actual de la bromatología?”. *Alimentaria: Revista de tecnología e higiene de los alimentos*, 348: 15 – 29.
- Bernard, M.A. Demystifying suberin. *Canadian Journal of Botany* 2002, 80, 227–240.
- Brosnan, T. & Sun, D. 2004. Improving quality inspection of food products by computer vision: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 3-16.
- Casp, A. y Abril, J. *Procesos de conservación de alimentos*. Barcelona: Mundiprensa, 1999. 494 p. ISBN: 84-7114-810-2.
- Chen, Y.; Martynenko, A. Computer Vision for Real-Time Measurements of Shrinkage and Color Changes in Blueberry Convective Drying. *Dry. Technol.* 2013, 31, 1114–1123. DOI: [https://doi-org.uchile.idm.oclc.org/10.1080/07373937.2013.775587](https://doi.org/uchile.idm.oclc.org/10.1080/07373937.2013.775587).
- Da Rocha, R.P., Melo, E., Corbín, J.B., Berbert, P.A., Donzeles, S., Tabar, J.A., 2012. Cinética del secado de tomillo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16(6), 675-683.
- Darvishi, H., Asl, A., Asghari, A., Najafi, G., Gazori, H.A., 2013. Mathematical modeling, moisture diffusion, energy consumption and efficiency of thin layer drying of potato slices. *Journal of Food Processing & Technology* 4(3), 215.
- Das, I., y Arora, A. (2017). Alternate microwave and convective hot air application for rapid mushroom drying. *Journal of Food Engineering*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.10.018>
- Durst, R. y Wrolstad, R.E. (2001). Separation and characterization of anthocyanins by HPLC. In: *Handbook of food analytical chemistry*. New Jersey: John Wiley & Sons; P. 33-45.
- Escobar, J and Cuatin, L. (2019). Influencia del tipo de secado sobre la obtención de mortiño (*vaccinium floribundum kunth*) deshidratado y en polvo. Universidad del Valle.
- Fava, J.; Alzamora, S.M.; Castro, M.A. Structure and nanostructure of the outer tangential epidermal cell wall in *Vaccinium corymbosum* L. (blueberry)

fruits by blanching, freezing–thawing and ultrasound. *Food Science and Technology International* 2006, 12, 241–251.

- Feippe, A., Ibañez, F., Fredes, A., Valera, P. y Lado, J. (2012). EFECTO DEL ESTADO DE DESARROLLO DE ARÁNDANOS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS. [en línea] <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2125/1/18429091012113202.pdf>> [consulta: 28 de agosto de 2022].
- Fengying Chen, Min Zhang, Sakamon, D. and Dongxing Yu. (2021). Comparative Evaluation of the Properties of Deep-Frozen Blueberries Dried by Vacuum Infrared Freeze Drying with the Use of CO₂ Laser Perforation, Ultrasound, and Freezing–Thawing as Pretreatments. *Food and Bioprocess Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-021-02677-0>
- Francis, F. J., & Clydesdale, F. M. (1975). *Food colorimetry: theory and applications*. Westport, CT: AVI Publishing.
- Fructuoso Peñalver, Noelia. Efecto de diferentes pretratamientos sobre la cinética de secado y la calidad de setas deshidratadas. Universidad Politécnica de Cartagena, 2018.
- Goyal, R. K., Kingsly, A. R. P., Manikantan, M. R., & Ilyas, S. M. (2006). Thin-layer drying kinetics of raw mango slices. *Biosystems Engineering*, 95(1), 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.05.001>
- Guo, Y., Wu, B., Guo, X., Ding, F., Pan, Z., & Ma, H. (2020). Effects of power ultrasound enhancement on infrared drying of carrot slices: Moisture migration and quality characterizations. *LWT – Food Science and Technology*, 126, 109312.
- Harman, D. (1956). Ageing: theory based on free radical and radiation chemistry. *J Gerontol.* 11:298-300.
- INDAP. (2021). Producción y mercado del Arándano. [en línea] <<https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/3arandanos-produccion-mercado.pdf?sfvrsn=0>> [consulta: 8 de abril de 2022].

- Jeffree C.E., Baker E.A. and Holloway P.J. (1976). Origins of the fine structure of plant epicuticular waxes. In: Dickinson C.H. and Preece T.F. (eds), *Microbiology of Aerial Plant Surface*. London: Academic Press.
- Kerstiens G. (1996). Signaling across the divide: a wider perspective of cuticular structure-function relationships. *Trends Plant Science* 1: 125–129.
- Koukouch, A., Idlimam, A., Asbik, M., Sarh, B., Izrar, B., Bostyn, S. and Amine, A. (2017). Experimental determination of the effective moisture diffusivity and activation energy during convective solar drying of olive pomace waste. *Renewable Energy*, 101(Supplement C), 565-574. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.006>
- Lawless, H. T., & Heymann, H. (1998). *Sensory evaluation of food: principles and practices*. New York: Chapman & Hall, pp. 406–429.
- M. Aghbashlo, S. Hosseinpour, M. Ghasemi-Varnamkhasti. Computer vision technology for real-time food quality assurance during drying process. *Trends in Food Science & Technology*, 39 (1) (2014), pp. 76-84, 10.1016/j.tifs.2014.06.003
- Madamba, P. S., Driscoll, R. H., & Buckle, K. A. (1996). Thin layer drying characteristics of garlic slices. *Journal of Food Engineering*, 29, 75–97.
- Malleret, D., Lesa, C., Zapata, M., Heredia, M., Quinteros, F., Betoret, N. & Scala K. (2020). MODELIZACIÓN DE LA CINÉTICA DE SECADO EN PASAS DE ARANDANOS OSMODESHIDRATADAS. (*V. corymbosum*, L.). DOI: 10.13140/RG.2.2.23803.46884
- Mark, R., Lyu, X., Lee, J., Parra-Saldivar, R., & Chen, W. (2019). Sustainable production of natural phenolics for functional food applications. *Journal of Functional Foods*, 233-254.
- Mayor, L. & Sereno, M. (2004). Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 373–386.
- Melchor, M. (2018). Selección de la temperatura de secado más adecuada y efecto del triturado y almacenamiento sobre las propiedades físico-químicas y funcionales de un polvo de bagazo de arándano obtenido mediante secado por aire caliente. Universidad Politécnica de Valencia.

- Moreira, R., Figueiredo, A., & Sereno, A. (2000). Shrinkage of apple disks during drying by warm air convection and freeze drying. *Drying Technology*, 18(1&2), 279–294.
- N. P. Zogzas, Z. B. Maroulis, and D. Marinos-Kouris, “Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs,” *Drying Technology*, vol. 14, no. 10, pp. 2225–2253, 1996.
- Nowacka, M. y Wedzik, M. (2016). Effect of ultrasound treatment on microstructure, colour and carotenoid content in fresh and dried carrot tissue. *Applied Acoustics*, 103, pp. 163-171.
- ODEPA. (2021). Boletín de fruta, noviembre 2021. [en línea] < <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-de-fruta-noviembre-2021> > [consulta: 8 de abril de 2022].
- Omar Vuarant, Carlos. "Optimización del proceso de secado de arándanos por infrarrojos. Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- OMS. (2018). Alimentación sana. [en línea] < <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet> > [consulta: 28 de agosto de 2022].
- Ozdemir, M. & Devres, O. (1999). The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. *Journal of Food Engineering*, 42, 225-233.
- P. Das, A. Darwish, A. Ismail. *et al.* (2021) Diversity in blueberry genotypes and developmental stages enables discrepancy in the bioactive compounds, metabolites, and cytotoxicity. *Food Chemistry*, 374(2021), pp. 66-77, <https://doi-org.uchile.idm.oclc.org/10.1016/j.foodchem.2021.131632>
- Park, K. J.; Vohnikova, Z.; Brod, F. P. R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.) *Journal of Food Engineering*, v.1, p.193-199, 2002.
- Sara Silva, Eduardo M. Costa, Mariana Veiga, Rui M. Morais, Conceição Calhau & Manuela Pintado (2020) Health promoting properties of blueberries: a review, *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60:2, 181-200, DOI: 10.1080/10408398.2018.1518895

- Simal, S., Femenia, A., Garau, M.C. and Rosselló, C. (2005). Use of exponential, Page's and difusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *Journal of Food Engineering*, 66: 323-328.
- T. Defraeye, A. Radu. Insights in convective drying of fruit by coupled modeling of fruit drying, deformation, quality evolution and convective exchange with the airflow *Appl. Therm. Eng.*, 129 (2018), pp. 1026-1038, 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.082
- Tibble, D.L. (1998). Further evidence of the cardiovascular benefits of diets enriched in carotenoids. *Am J Clin Nutr.* 68:521-522.
- Udomkun, P., Nagle, M., Argyropoulos, D. *et al.* Computer vision coupled with laser backscattering for non-destructive colour evaluation of papaya during drying. *Food Measure* **11**, 2142–2150 (2017). [https://doi-org.uchile.idm.oclc.org/10.1007/s11694-017-9598-y](https://doi.org/uchile.idm.oclc.org/10.1007/s11694-017-9598-y)
- USDA. (2019). Food Data Central: Blueberry,raw. [en línea] < <https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/171711/nutrients> > [consulta: 8 de abril de 2022].
- USDA-FAS. (2021). Blueberries Around the Globe – Past, Present, and Future [en línea] < <https://www.fas.usda.gov/search?keyword=Blueberries+Around+the+Globe+%E2%80%93+Past%2C+Present%2C+and+Future> > [consulta: 8 de abril de 2022].
- Vega-Gálvez, A.; Lara, E.; Flores, V.; Di Scala, K.; Lemus-Mondaca, R. Effects of selected pretreatments on convective drying process of blueberries (var. O'Neil). *Food Bioprocess & Technology* 2011, 5(7), 2797–2804.
- Vega-Gálvez, A.A.; Miranda, M.M.; Yagnam, F.F.; Lemus-Mondaca, R.R.; Tello-Ireland, C.C. Kinetic study of convective drying of blueberry variety O'Neil (*Vaccinium corymbosum* L.). *Chilean Journal of Agricultural Research* 2009, 69(2), 171–178.
- W. Liu, M. Zhang, A.S. Mujumdar, B. Chitrakar, D. Yu. Effects of chitosan coating on freeze-drying of blueberry enhanced by ultrasound pre-treatment

in sodium bicarbonate médium. *Int. J. Biol. Macromol.*, 181 (2021), pp. 631-643

- Wang, Z., Sun, J. and Liao, X. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. *Food Research International*, 40 (1): 39-46, 2007.
- Yam, L. & Papadakis, E. 2004. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces: a review. *Journal of Food Engineering*, 61, 137-142.
- Zanotti, I., Dall'AstaM., Mena, P., Bruni, R., Ray, S. and Del Rio, D. 2015. Athoreprotective effects of (poli)phenols: a focus on cell cholesterol metabolism. *Food and Function*, Vol. 6, pp.13.
- Zielinska, M. & Michalska, A. (2016). Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and textura. *Food Chemistry*, 212, 671-680.

9. ANEXOS

ANEXO 1. Cinética de secado

Secado de arándanos a 50°C

| 50°C | MR control | | | MR ultrasonido | | | MR escaldado | | |
|----------------|-------------------|----------|----------|-----------------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|
| t (min) | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 15 | 0,9780 | 0,9788 | 0,9772 | 0,9737 | 0,9759 | 0,9715 | 0,9746 | 0,9765 | 0,9728 |
| 30 | 0,9690 | 0,9707 | 0,9674 | 0,9623 | 0,9662 | 0,9585 | 0,9621 | 0,9656 | 0,9585 |
| 45 | 0,9593 | 0,9615 | 0,9571 | 0,9513 | 0,9567 | 0,9458 | 0,9514 | 0,9568 | 0,9460 |
| 60 | 0,9508 | 0,9539 | 0,9476 | 0,9417 | 0,9481 | 0,9352 | 0,9399 | 0,9473 | 0,9325 |
| 75 | 0,9425 | 0,9463 | 0,9387 | 0,9307 | 0,9383 | 0,9231 | 0,9287 | 0,9374 | 0,9200 |
| 90 | 0,9339 | 0,9385 | 0,9293 | 0,9200 | 0,9289 | 0,9111 | 0,9176 | 0,9283 | 0,9069 |
| 105 | 0,9255 | 0,9307 | 0,9204 | 0,9096 | 0,9197 | 0,8995 | 0,9072 | 0,9193 | 0,8951 |
| 120 | 0,9169 | 0,9229 | 0,9109 | 0,8993 | 0,9106 | 0,8881 | 0,8983 | 0,9134 | 0,8831 |
| 135 | 0,9088 | 0,9154 | 0,9022 | 0,8880 | 0,9006 | 0,8754 | 0,8864 | 0,9016 | 0,8713 |
| 150 | 0,8980 | 0,9060 | 0,8901 | 0,8797 | 0,8935 | 0,8660 | 0,8782 | 0,8948 | 0,8617 |
| 165 | 0,8916 | 0,8997 | 0,8835 | 0,8667 | 0,8819 | 0,8514 | 0,8664 | 0,8846 | 0,8482 |
| 180 | 0,8830 | 0,8917 | 0,8744 | 0,8568 | 0,8730 | 0,8405 | 0,8566 | 0,8767 | 0,8365 |
| 195 | 0,8748 | 0,8842 | 0,8654 | 0,8459 | 0,8634 | 0,8284 | 0,8473 | 0,8686 | 0,8260 |
| 210 | 0,8664 | 0,8763 | 0,8565 | 0,8353 | 0,8540 | 0,8166 | 0,8356 | 0,8599 | 0,8113 |
| 225 | 0,8578 | 0,8682 | 0,8473 | 0,8262 | 0,8465 | 0,8060 | 0,8286 | 0,8530 | 0,8042 |
| 240 | 0,8505 | 0,8615 | 0,8396 | 0,8169 | 0,8382 | 0,7956 | 0,8168 | 0,8444 | 0,7893 |
| 300 | 0,8076 | 0,8216 | 0,7936 | 0,7567 | 0,7787 | 0,7348 | 0,7737 | 0,7992 | 0,7482 |
| 360 | 0,7744 | 0,7912 | 0,7577 | 0,7245 | 0,7502 | 0,6989 | 0,7356 | 0,7650 | 0,7063 |
| 420 | 0,7417 | 0,7606 | 0,7228 | 0,6873 | 0,7173 | 0,6574 | 0,7024 | 0,7356 | 0,6691 |
| 480 | 0,7098 | 0,7312 | 0,6885 | 0,6504 | 0,6851 | 0,6158 | 0,6716 | 0,7084 | 0,6348 |
| 540 | 0,6756 | 0,6999 | 0,6513 | 0,6174 | 0,6538 | 0,5810 | 0,6407 | 0,6800 | 0,6014 |
| 600 | 0,6431 | 0,6700 | 0,6162 | 0,5745 | 0,6194 | 0,5296 | 0,6121 | 0,6541 | 0,5700 |
| 660 | 0,6044 | 0,6347 | 0,5740 | 0,5226 | 0,5680 | 0,4771 | 0,5751 | 0,6168 | 0,5334 |
| 720 | 0,5723 | 0,6054 | 0,5392 | 0,4913 | 0,5414 | 0,4412 | 0,5462 | 0,5900 | 0,5024 |
| 780 | 0,5426 | 0,5779 | 0,5073 | 0,4587 | 0,5133 | 0,4041 | 0,5210 | 0,5669 | 0,4752 |
| 840 | 0,5138 | 0,5515 | 0,4761 | 0,4284 | 0,4869 | 0,3698 | 0,4971 | 0,5448 | 0,4494 |
| 900 | 0,4920 | 0,5269 | 0,4571 | 0,4109 | 0,4637 | 0,3582 | 0,4728 | 0,5196 | 0,4260 |
| 960 | 0,4780 | 0,5150 | 0,4410 | 0,3864 | 0,4478 | 0,3250 | 0,4486 | 0,5002 | 0,3970 |
| 1020 | 0,4581 | 0,4964 | 0,4197 | 0,3785 | 0,4306 | 0,3263 | 0,4316 | 0,4801 | 0,3830 |
| 1080 | 0,4354 | 0,4734 | 0,3973 | 0,3576 | 0,4101 | 0,3051 | 0,4150 | 0,4651 | 0,3649 |
| 1140 | 0,4194 | 0,4532 | 0,3855 | 0,3316 | 0,3848 | 0,2784 | 0,3882 | 0,4343 | 0,3421 |

| | | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1200 | 0,3993 | 0,4334 | 0,3652 | 0,3115 | 0,3647 | 0,2584 | 0,3647 | 0,4164 | 0,3131 |
| 1260 | 0,3805 | 0,4149 | 0,3460 | 0,2922 | 0,3458 | 0,2387 | 0,3459 | 0,3975 | 0,2942 |
| 1320 | 0,3565 | 0,3949 | 0,3182 | 0,2797 | 0,3333 | 0,2262 | 0,3393 | 0,3887 | 0,2898 |
| 1380 | 0,3416 | 0,3782 | 0,3049 | 0,2591 | 0,3123 | 0,2060 | 0,3172 | 0,3669 | 0,2674 |
| 1440 | 0,3260 | 0,3637 | 0,2883 | 0,2425 | 0,2955 | 0,1896 | 0,2998 | 0,3495 | 0,2500 |

Secado de arándanos a 60°C

| 60°C t (min) | MR control | | | MR ultrasonido | | | MR escaldado | | |
|-----------------|------------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 15 | 0,9552 | 0,9579 | 0,9525 | 0,9541 | 0,9551 | 0,9532 | 0,9562 | 0,9567 | 0,9557 |
| 30 | 0,9300 | 0,9394 | 0,9205 | 0,9355 | 0,9369 | 0,9341 | 0,9376 | 0,9388 | 0,9363 |
| 45 | 0,9113 | 0,9178 | 0,9049 | 0,9095 | 0,9122 | 0,9068 | 0,9116 | 0,9150 | 0,9082 |
| 60 | 0,8899 | 0,8973 | 0,8825 | 0,8860 | 0,8898 | 0,8822 | 0,8904 | 0,8956 | 0,8851 |
| 75 | 0,8702 | 0,8796 | 0,8608 | 0,8655 | 0,8703 | 0,8607 | 0,8688 | 0,8759 | 0,8617 |
| 90 | 0,8505 | 0,8609 | 0,8401 | 0,8446 | 0,8500 | 0,8393 | 0,8479 | 0,8565 | 0,8393 |
| 105 | 0,8303 | 0,8419 | 0,8187 | 0,8210 | 0,8282 | 0,8138 | 0,8268 | 0,8374 | 0,8163 |
| 120 | 0,8102 | 0,8227 | 0,7977 | 0,8009 | 0,8093 | 0,7926 | 0,8054 | 0,8177 | 0,7932 |
| 135 | 0,7904 | 0,8042 | 0,7766 | 0,7818 | 0,7910 | 0,7727 | 0,7827 | 0,7969 | 0,7685 |
| 150 | 0,7710 | 0,7850 | 0,7569 | 0,7602 | 0,7705 | 0,7499 | 0,7622 | 0,7784 | 0,7459 |
| 165 | 0,7512 | 0,7662 | 0,7361 | 0,7410 | 0,7525 | 0,7295 | 0,7374 | 0,7562 | 0,7186 |
| 180 | 0,7314 | 0,7471 | 0,7157 | 0,7209 | 0,7337 | 0,7082 | 0,7165 | 0,7373 | 0,6957 |
| 195 | 0,7113 | 0,7280 | 0,6947 | 0,6975 | 0,7114 | 0,6836 | 0,6957 | 0,7187 | 0,6728 |
| 210 | 0,6909 | 0,7082 | 0,6736 | 0,6807 | 0,6958 | 0,6657 | 0,6715 | 0,6971 | 0,6460 |
| 225 | 0,6713 | 0,6905 | 0,6522 | 0,6628 | 0,6795 | 0,6461 | 0,6524 | 0,6804 | 0,6244 |
| 240 | 0,6517 | 0,6717 | 0,6316 | 0,6404 | 0,6579 | 0,6229 | 0,6337 | 0,6633 | 0,6041 |
| 300 | 0,5714 | 0,5980 | 0,5448 | 0,5727 | 0,5948 | 0,5507 | 0,4935 | 0,5258 | 0,4612 |
| 360 | 0,5001 | 0,5373 | 0,4629 | 0,4516 | 0,4654 | 0,4378 | 0,4314 | 0,4733 | 0,3895 |
| 420 | 0,4317 | 0,4752 | 0,3882 | 0,3972 | 0,4111 | 0,3832 | 0,3764 | 0,4235 | 0,3293 |
| 480 | 0,3685 | 0,4161 | 0,3209 | 0,3477 | 0,3632 | 0,3321 | 0,3247 | 0,3750 | 0,2743 |
| 540 | 0,3106 | 0,3594 | 0,2618 | 0,3029 | 0,3183 | 0,2875 | 0,2781 | 0,3301 | 0,2261 |
| 600 | 0,2619 | 0,3083 | 0,2156 | 0,2599 | 0,2739 | 0,2458 | 0,2444 | 0,2864 | 0,2024 |
| 660 | 0,2221 | 0,2630 | 0,1813 | 0,2210 | 0,2291 | 0,2129 | 0,1944 | 0,2241 | 0,1647 |
| 720 | 0,1911 | 0,2247 | 0,1574 | 0,1789 | 0,1876 | 0,1703 | 0,1725 | 0,1955 | 0,1495 |
| 780 | 0,1677 | 0,1958 | 0,1396 | 0,1607 | 0,1717 | 0,1498 | 0,1568 | 0,1770 | 0,1366 |
| 840 | 0,1464 | 0,1687 | 0,1241 | 0,1501 | 0,1617 | 0,1384 | 0,1465 | 0,1655 | 0,1275 |
| 900 | 0,1327 | 0,1549 | 0,1105 | 0,1356 | 0,1476 | 0,1236 | 0,1327 | 0,1506 | 0,1147 |
| 960 | 0,1197 | 0,1413 | 0,0981 | 0,1231 | 0,1348 | 0,1113 | 0,1190 | 0,1367 | 0,1013 |
| 1020 | 0,1082 | 0,1297 | 0,0866 | 0,1082 | 0,1220 | 0,0944 | 0,1068 | 0,1244 | 0,0893 |
| 1080 | 0,0977 | 0,1191 | 0,0763 | 0,0970 | 0,1102 | 0,0838 | 0,0962 | 0,1136 | 0,0788 |

| | | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1140 | 0,0880 | 0,1092 | 0,0667 | 0,0877 | 0,1009 | 0,0745 | 0,0866 | 0,1041 | 0,0692 |
| 1200 | 0,0790 | 0,1001 | 0,0578 | 0,0786 | 0,0916 | 0,0656 | 0,0784 | 0,0959 | 0,0608 |
| 1260 | 0,0711 | 0,0923 | 0,0500 | 0,0704 | 0,0837 | 0,0572 | 0,0703 | 0,0876 | 0,0529 |

Secado de arándanos a 70°C

| 70°C t (min) | MR control | | | MR ultrasonido | | | MR escaldado | | |
|-----------------|------------|--------|--------|----------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |
| 15 | 0,9354 | 0,9430 | 0,9278 | 0,9450 | 0,9456 | 0,9444 | 0,9457 | 0,9505 | 0,9409 |
| 30 | 0,8811 | 0,8955 | 0,8667 | 0,8834 | 0,8911 | 0,8757 | 0,8963 | 0,9056 | 0,8871 |
| 45 | 0,8296 | 0,8501 | 0,8090 | 0,8242 | 0,8367 | 0,8117 | 0,8484 | 0,8619 | 0,8348 |
| 60 | 0,7790 | 0,8033 | 0,7546 | 0,7764 | 0,7923 | 0,7606 | 0,8044 | 0,8225 | 0,7863 |
| 75 | 0,7302 | 0,7589 | 0,7015 | 0,7087 | 0,7309 | 0,6865 | 0,7260 | 0,7494 | 0,7026 |
| 90 | 0,6830 | 0,7164 | 0,6496 | 0,6547 | 0,6803 | 0,6290 | 0,6793 | 0,7073 | 0,6512 |
| 105 | 0,6377 | 0,6758 | 0,5996 | 0,6048 | 0,6318 | 0,5778 | 0,6343 | 0,6656 | 0,6029 |
| 120 | 0,5936 | 0,6346 | 0,5526 | 0,5235 | 0,5541 | 0,4928 | 0,5602 | 0,5980 | 0,5224 |
| 135 | 0,5358 | 0,5803 | 0,4913 | 0,4831 | 0,5154 | 0,4507 | 0,5209 | 0,5617 | 0,4801 |
| 150 | 0,4887 | 0,5344 | 0,4431 | 0,4480 | 0,4814 | 0,4145 | 0,4909 | 0,5342 | 0,4476 |
| 165 | 0,4505 | 0,4974 | 0,4035 | 0,4077 | 0,4407 | 0,3748 | 0,4502 | 0,4957 | 0,4046 |
| 180 | 0,4124 | 0,4596 | 0,3653 | 0,3695 | 0,4012 | 0,3378 | 0,4080 | 0,4559 | 0,3602 |
| 195 | 0,3742 | 0,4205 | 0,3279 | 0,3435 | 0,3729 | 0,3141 | 0,3773 | 0,4259 | 0,3287 |
| 210 | 0,3405 | 0,3847 | 0,2963 | 0,3185 | 0,3441 | 0,2928 | 0,3442 | 0,3932 | 0,2952 |
| 225 | 0,3098 | 0,3520 | 0,2676 | 0,2949 | 0,3162 | 0,2737 | 0,3104 | 0,3567 | 0,2642 |
| 240 | 0,2815 | 0,3210 | 0,2419 | 0,2776 | 0,2951 | 0,2601 | 0,2826 | 0,3278 | 0,2375 |
| 300 | 0,1989 | 0,2300 | 0,1678 | 0,2215 | 0,2332 | 0,2097 | 0,1821 | 0,2119 | 0,1523 |
| 360 | 0,1494 | 0,1785 | 0,1203 | 0,1804 | 0,1931 | 0,1677 | 0,1349 | 0,1585 | 0,1113 |

ANEXO 2. Datos para determinar encogimiento en arándanos

Volumen de arándanos a 50°C

| 50°C t (min) | Control (cm3) | | | Ultrasonido (cm3) | | | Escaldado (cm3) | | |
|-----------------|---------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 2,1345 | 1,2016 | 1,5035 | 1,0976 | 1,1347 | 1,4952 | 1,1399 | 1,5380 | 1,5754 |
| 15 | 2,1068 | 1,2165 | 1,5553 | 1,0690 | 1,0965 | 1,5195 | 1,2014 | 1,6222 | 1,7210 |
| 30 | 2,0731 | 1,1953 | 1,5330 | 1,0571 | 1,0763 | 1,4944 | 1,1803 | 1,5987 | 1,7002 |
| 45 | 2,0400 | 1,1746 | 1,5110 | 1,0454 | 1,0566 | 1,4697 | 1,1594 | 1,5756 | 1,6797 |
| 60 | 1,9679 | 1,1339 | 1,4471 | 1,0175 | 1,0438 | 1,3865 | 1,1137 | 1,5334 | 1,6353 |
| 75 | 1,9753 | 1,1341 | 1,4679 | 1,0223 | 1,0181 | 1,4215 | 1,1189 | 1,5303 | 1,6394 |
| 90 | 1,9437 | 1,1144 | 1,4469 | 1,0109 | 0,9994 | 1,3980 | 1,0992 | 1,5082 | 1,6196 |

| | | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 105 | 1,9127 | 1,0950 | 1,4261 | 0,9997 | 0,9810 | 1,3749 | 1,0798 | 1,4864 | 1,6001 |
| 120 | 1,8615 | 1,0282 | 1,4737 | 1,0071 | 1,0294 | 1,3528 | 1,0696 | 1,4060 | 1,5222 |
| 135 | 1,8520 | 1,0573 | 1,3854 | 0,9776 | 0,9453 | 1,3298 | 1,0421 | 1,4437 | 1,5617 |
| 150 | 1,8224 | 1,0389 | 1,3655 | 0,9667 | 0,9280 | 1,3078 | 1,0237 | 1,4228 | 1,5429 |
| 165 | 1,7933 | 1,0208 | 1,3459 | 0,9560 | 0,9109 | 1,2862 | 1,0056 | 1,4022 | 1,5242 |
| 180 | 1,6869 | 1,0324 | 1,2947 | 0,9258 | 0,8296 | 1,3486 | 1,0127 | 1,4435 | 1,5463 |
| 195 | 1,7365 | 0,9856 | 1,3076 | 0,9349 | 0,8778 | 1,2441 | 0,9705 | 1,3620 | 1,4877 |
| 210 | 1,7087 | 0,9685 | 1,2888 | 0,9245 | 0,8616 | 1,2235 | 0,9534 | 1,3423 | 1,4697 |
| 225 | 1,6814 | 0,9517 | 1,2703 | 0,9142 | 0,8458 | 1,2033 | 0,9366 | 1,3228 | 1,4520 |
| 240 | 1,6741 | 0,9869 | 1,2073 | 0,9204 | 0,8250 | 1,2594 | 0,9583 | 1,3601 | 1,5241 |
| 300 | 1,5513 | 0,8718 | 1,1817 | 0,8646 | 0,7709 | 1,1071 | 0,8568 | 1,2299 | 1,3665 |
| 360 | 1,5634 | 0,8327 | 1,2122 | 0,8001 | 0,6758 | 1,0188 | 0,8659 | 1,2805 | 1,4206 |
| 420 | 1,3637 | 0,7577 | 1,0526 | 0,7907 | 0,6647 | 0,9689 | 0,7432 | 1,0946 | 1,2400 |
| 480 | 1,2786 | 0,7064 | 0,9934 | 0,7561 | 0,6172 | 0,9064 | 0,6921 | 1,0326 | 1,1812 |
| 540 | 1,1988 | 0,6585 | 0,9376 | 0,7231 | 0,5730 | 0,8480 | 0,6446 | 0,9741 | 1,1253 |
| 600 | 1,2525 | 0,7216 | 1,0263 | 0,6584 | 0,4678 | 0,7981 | 0,7102 | 1,0203 | 1,2589 |
| 660 | 1,0538 | 0,5723 | 0,8351 | 0,6613 | 0,4941 | 0,7421 | 0,5591 | 0,8669 | 1,0211 |
| 720 | 0,9881 | 0,5336 | 0,7882 | 0,6324 | 0,4587 | 0,6943 | 0,5207 | 0,8179 | 0,9727 |
| 780 | 0,9264 | 0,4974 | 0,7439 | 0,6047 | 0,4259 | 0,6495 | 0,4849 | 0,7716 | 0,9266 |
| 840 | 0,8686 | 0,4637 | 0,7021 | 0,5783 | 0,3955 | 0,6076 | 0,4516 | 0,7279 | 0,8827 |
| 900 | 0,9015 | 0,4544 | 0,8201 | 0,6430 | 0,4545 | 0,5964 | 0,4148 | 0,6962 | 0,9760 |
| 960 | 0,7636 | 0,4030 | 0,6254 | 0,5289 | 0,3410 | 0,5318 | 0,3917 | 0,6478 | 0,8010 |
| 1020 | 0,7159 | 0,3757 | 0,5902 | 0,5058 | 0,3166 | 0,4975 | 0,3648 | 0,6111 | 0,7630 |
| 1080 | 0,6712 | 0,3503 | 0,5571 | 0,4837 | 0,2940 | 0,4654 | 0,3397 | 0,5765 | 0,7269 |
| 1140 | 0,6293 | 0,3266 | 0,5258 | 0,4625 | 0,2730 | 0,4354 | 0,3164 | 0,5439 | 0,6924 |
| 1200 | 0,4249 | 0,1823 | 0,3014 | 0,4056 | 0,2342 | 0,3423 | 0,1648 | 0,3571 | 0,4367 |
| 1260 | 0,5532 | 0,2838 | 0,4683 | 0,4230 | 0,2353 | 0,3810 | 0,2744 | 0,4840 | 0,6283 |
| 1320 | 0,5187 | 0,2646 | 0,4420 | 0,4045 | 0,2185 | 0,3565 | 0,2556 | 0,4566 | 0,5986 |
| 1380 | 0,4863 | 0,2467 | 0,4172 | 0,3868 | 0,2029 | 0,3335 | 0,2380 | 0,4308 | 0,5702 |
| 1440 | 0,3558 | 0,1731 | 0,2566 | 0,3609 | 0,2306 | 0,2817 | 0,1494 | 0,3427 | 0,3762 |

Volumen de arándanos a 60°C

| 60°C t (min) | Control (cm3) | | | Ultrasonido (cm3) | | | Escaldado (cm3) | | |
|-----------------|---------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 1,6401 | 1,9993 | 1,5627 | 1,2582 | 1,5540 | 1,7007 | 1,5057 | 1,2981 | 1,5805 |
| 15 | 1,6307 | 1,9275 | 1,4205 | 1,1733 | 1,5042 | 1,6544 | 1,4215 | 1,2538 | 1,5564 |
| 30 | 1,5824 | 1,8800 | 1,3939 | 1,1549 | 1,4835 | 1,6305 | 1,3902 | 1,2335 | 1,5326 |
| 45 | 1,5405 | 1,8390 | 1,3712 | 1,1333 | 1,4592 | 1,6023 | 1,3545 | 1,2099 | 1,5046 |
| 60 | 1,5178 | 1,7681 | 1,3096 | 1,0910 | 1,4086 | 1,5627 | 1,2908 | 1,1755 | 1,4477 |
| 75 | 1,4561 | 1,7555 | 1,3242 | 1,0947 | 1,4157 | 1,5521 | 1,2899 | 1,1670 | 1,4539 |

| | | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 90 | 1,4158 | 1,7154 | 1,3015 | 1,0760 | 1,3945 | 1,5276 | 1,2590 | 1,1464 | 1,4296 |
| 105 | 1,3758 | 1,6753 | 1,2787 | 1,0572 | 1,3733 | 1,5032 | 1,2267 | 1,1246 | 1,4038 |
| 120 | 1,4202 | 1,6504 | 1,2681 | 1,0235 | 1,3237 | 1,4267 | 1,1877 | 1,1122 | 1,3803 |
| 135 | 1,2987 | 1,5974 | 1,2340 | 1,0194 | 1,3303 | 1,4537 | 1,1688 | 1,0856 | 1,3576 |
| 150 | 1,2616 | 1,5597 | 1,2123 | 1,0014 | 1,3098 | 1,4301 | 1,1391 | 1,0654 | 1,3336 |
| 165 | 1,2248 | 1,5222 | 1,1905 | 0,9816 | 1,2872 | 1,4041 | 1,1114 | 1,0464 | 1,3112 |
| 180 | 1,1816 | 1,4597 | 1,1461 | 0,9791 | 1,3215 | 1,3773 | 1,1397 | 0,9527 | 1,3615 |
| 195 | 1,1532 | 1,4484 | 1,1475 | 0,9460 | 1,2466 | 1,3574 | 1,0538 | 1,0066 | 1,2639 |
| 210 | 1,1178 | 1,4117 | 1,1259 | 0,9269 | 1,2247 | 1,3323 | 1,0289 | 0,9894 | 1,2435 |
| 225 | 1,0838 | 1,3764 | 1,1050 | 0,9103 | 1,2057 | 1,3104 | 1,0036 | 0,9718 | 1,2226 |
| 240 | 1,0601 | 1,4077 | 1,0270 | 0,9171 | 1,2076 | 1,4050 | 0,9494 | 1,0146 | 1,2022 |
| 300 | 0,9203 | 1,2040 | 1,0019 | 0,8004 | 1,0788 | 1,1651 | 0,8817 | 0,8857 | 1,1201 |
| 360 | 0,7548 | 1,0695 | 0,8608 | 0,6548 | 0,9999 | 1,0556 | 0,7018 | 0,8125 | 1,0323 |
| 420 | 0,7002 | 0,9664 | 0,8564 | 0,6931 | 0,9546 | 1,0229 | 0,6810 | 0,7394 | 0,9453 |
| 480 | 0,6051 | 0,8617 | 0,7908 | 0,6452 | 0,8987 | 0,9592 | 0,6125 | 0,6883 | 0,8841 |
| 540 | 0,5197 | 0,7663 | 0,7302 | 0,6013 | 0,8472 | 0,9005 | 0,5507 | 0,6413 | 0,8277 |
| 600 | 0,4288 | 0,6487 | 0,6641 | 0,5200 | 0,7624 | 0,8423 | 0,4748 | 0,5917 | 0,7070 |
| 660 | 0,3850 | 0,6125 | 0,6301 | 0,5223 | 0,7537 | 0,7943 | 0,4415 | 0,5562 | 0,7251 |
| 720 | 0,3341 | 0,5529 | 0,5900 | 0,4939 | 0,7195 | 0,7558 | 0,3901 | 0,5154 | 0,6756 |
| 780 | 0,2928 | 0,5033 | 0,5558 | 0,4695 | 0,6899 | 0,7225 | 0,3572 | 0,4877 | 0,6421 |
| 840 | 0,2558 | 0,4583 | 0,5241 | 0,4487 | 0,6644 | 0,6939 | 0,3313 | 0,4651 | 0,6144 |
| 900 | 0,2146 | 0,4037 | 0,5329 | 0,4850 | 0,6282 | 0,6223 | 0,3321 | 0,4690 | 0,5762 |
| 960 | 0,2021 | 0,3900 | 0,4738 | 0,4072 | 0,6131 | 0,6365 | 0,2813 | 0,4206 | 0,5597 |
| 1020 | 0,1796 | 0,3607 | 0,4514 | 0,3886 | 0,5898 | 0,6106 | 0,2577 | 0,3992 | 0,5334 |
| 1080 | 0,1596 | 0,3342 | 0,4307 | 0,3715 | 0,5683 | 0,5867 | 0,2379 | 0,3806 | 0,5104 |
| 1140 | 0,1416 | 0,3100 | 0,4115 | 0,3558 | 0,5482 | 0,5645 | 0,2207 | 0,3638 | 0,4895 |
| 1200 | 0,1667 | 0,3290 | 0,4732 | 0,3835 | 0,5662 | 0,5773 | 0,2651 | 0,3090 | 0,4998 |
| 1260 | 0,1114 | 0,2684 | 0,3773 | 0,3278 | 0,5121 | 0,5248 | 0,1903 | 0,3334 | 0,4515 |

Volumen de arándanos a 70°C

| 70°C t (min) | Control (cm3) | | | Ultrasonido (cm3) | | | Escaldado (cm3) | | |
|-----------------|---------------|--------|--------|-------------------|--------|--------|-----------------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 0 | 1,0310 | 0,8603 | 0,7601 | 1,1489 | 1,0232 | 0,8748 | 0,8202 | 1,1491 | 0,9955 |
| 15 | 0,9620 | 0,8454 | 0,7224 | 1,1366 | 0,9703 | 0,8278 | 0,7720 | 1,1728 | 1,0316 |
| 30 | 0,9135 | 0,8096 | 0,6995 | 1,1041 | 0,9419 | 0,7960 | 0,7421 | 1,1349 | 0,9937 |
| 45 | 0,8675 | 0,7752 | 0,6774 | 1,0726 | 0,9143 | 0,7654 | 0,7134 | 1,0982 | 0,9571 |
| 60 | 0,7725 | 0,8654 | 0,6532 | 1,0852 | 0,8590 | 0,7821 | 0,7058 | 1,0011 | 1,0330 |
| 75 | 0,7823 | 0,7109 | 0,6351 | 1,0122 | 0,8615 | 0,7078 | 0,6592 | 1,0283 | 0,8880 |
| 90 | 0,7429 | 0,6808 | 0,6149 | 0,9833 | 0,8363 | 0,6806 | 0,6337 | 0,9950 | 0,8554 |

| | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 105 | 0,7055 | 0,6519 | 0,5955 | 0,9552 | 0,8118 | 0,6545 | 0,6091 | 0,9628 | 0,8239 |
| 120 | 0,7790 | 0,5417 | 0,5602 | 0,9150 | 0,7837 | 0,5732 | 0,5603 | 1,0134 | 0,8369 |
| 135 | 0,6362 | 0,5979 | 0,5583 | 0,9014 | 0,7649 | 0,6052 | 0,5629 | 0,9015 | 0,7644 |
| 150 | 0,6041 | 0,5725 | 0,5406 | 0,8756 | 0,7425 | 0,5819 | 0,5411 | 0,8724 | 0,7363 |
| 165 | 0,5737 | 0,5483 | 0,5234 | 0,8506 | 0,7208 | 0,5596 | 0,5201 | 0,8442 | 0,7092 |
| 180 | 0,4416 | 0,4008 | 0,5032 | 0,8547 | 0,7123 | 0,4751 | 0,4650 | 0,9323 | 0,7153 |
| 195 | 0,5173 | 0,5028 | 0,4908 | 0,8027 | 0,6792 | 0,5174 | 0,4806 | 0,7904 | 0,6580 |
| 210 | 0,4913 | 0,4815 | 0,4752 | 0,7798 | 0,6593 | 0,4976 | 0,4620 | 0,7649 | 0,6338 |
| 225 | 0,4665 | 0,4611 | 0,4602 | 0,7575 | 0,6400 | 0,4785 | 0,4441 | 0,7401 | 0,6105 |
| 240 | 0,4178 | 0,5158 | 0,4335 | 0,6652 | 0,5988 | 0,4618 | 0,3810 | 0,8497 | 0,3863 |
| 300 | 0,3603 | 0,3713 | 0,3917 | 0,6553 | 0,5516 | 0,3934 | 0,3645 | 0,6279 | 0,5062 |
| 360 | 0,3552 | 0,3533 | 0,3674 | 0,6163 | 0,5106 | 0,4036 | 0,3899 | 0,3220 | 0,5257 |

ANEXO 3. Datos para determinar color en arándanos

Color de arándanos a 50°C

| 50°C | Control 1 | | | Control 2 | | | Control 3 | | |
|---------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| t (min) | L* | a* | b* | L* | a* | b* | L* | a* | b* |
| 0 | 15,65 | -4,36 | -4,30 | 12,85 | -4,07 | -5,03 | 11,89 | -5,45 | -0,76 |
| 60 | 15,53 | -4,30 | -4,30 | 12,78 | -4,07 | -4,88 | 11,71 | -5,44 | -0,70 |
| 120 | 15,45 | -4,29 | -4,06 | 12,75 | -4,05 | -4,83 | 11,69 | -5,44 | -0,65 |
| 180 | 15,42 | -3,97 | -3,98 | 12,75 | -4,01 | -4,69 | 11,64 | -5,43 | -0,65 |
| 240 | 15,27 | -3,95 | -3,72 | 12,63 | -3,94 | -4,53 | 11,58 | -5,43 | -0,61 |
| 360 | 15,16 | -3,60 | -3,61 | 12,54 | -3,90 | -4,50 | 11,32 | -5,43 | -0,47 |
| 600 | 15,16 | -3,54 | -3,60 | 12,47 | -3,87 | -4,31 | 11,24 | -5,42 | -0,41 |
| 900 | 15,00 | -3,46 | -3,58 | 12,33 | -3,87 | -4,17 | 11,16 | -5,42 | -0,33 |
| 1200 | 14,87 | -3,46 | -3,54 | 12,18 | -3,85 | -4,07 | 11,05 | -5,42 | -0,23 |
| 1440 | 14,73 | -3,44 | -3,24 | 12,14 | -3,85 | -3,76 | 11,02 | -5,42 | 0,10 |
| | Ultrasonido 1 | | | Ultrasonido 2 | | | Ultrasonido 3 | | |
| 0 | 16,56 | -3,24 | -2,82 | 14,03 | -2,91 | -3,62 | 12,53 | -4,49 | 0,47 |
| 60 | 16,51 | -2,98 | -2,66 | 13,80 | -2,84 | -3,44 | 12,65 | -4,33 | 0,59 |
| 120 | 16,36 | -2,91 | -2,62 | 13,69 | -2,67 | -3,29 | 12,40 | -4,25 | 0,68 |
| 180 | 16,31 | -2,42 | -2,59 | 13,60 | -2,59 | -3,21 | 12,24 | -4,22 | 0,72 |
| 240 | 16,11 | -2,40 | -2,48 | 13,40 | -2,52 | -3,13 | 12,14 | -3,92 | 0,73 |
| 360 | 15,86 | -2,28 | -2,32 | 13,19 | -2,38 | -2,80 | 12,09 | -3,88 | 0,83 |
| 600 | 15,77 | -2,25 | -2,31 | 13,18 | -2,38 | -2,77 | 11,81 | -3,75 | 1,19 |
| 900 | 15,61 | -1,91 | -2,20 | 12,96 | -2,35 | -2,39 | 11,63 | -3,75 | 1,21 |
| 1200 | 15,39 | -1,77 | -1,99 | 12,79 | -2,32 | -2,20 | 11,46 | -3,64 | 1,39 |
| 1440 | 15,11 | -1,71 | -1,64 | 12,40 | -2,24 | -1,93 | 11,34 | -3,60 | 1,81 |
| | Escaldado 1 | | | Escaldado 2 | | | Escaldado 3 | | |

| | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 15,67 | -3,19 | -4,13 | 12,90 | -2,83 | -4,56 | 12,31 | -4,40 | -0,65 |
| 60 | 15,97 | -2,86 | -3,72 | 13,47 | -2,76 | -4,40 | 12,21 | -4,15 | -0,05 |
| 120 | 15,95 | -2,73 | -3,69 | 13,23 | -2,72 | -4,40 | 12,16 | -4,11 | 0,00 |
| 180 | 15,90 | -2,60 | -3,55 | 13,05 | -2,65 | -4,28 | 12,15 | -4,06 | 0,07 |
| 240 | 15,65 | -2,41 | -3,53 | 12,93 | -2,65 | -4,27 | 12,09 | -4,01 | 0,08 |
| 360 | 15,62 | -2,34 | -3,51 | 12,80 | -2,64 | -4,19 | 11,79 | -3,98 | 0,18 |
| 600 | 15,31 | -2,11 | -3,31 | 12,80 | -2,40 | -4,09 | 11,75 | -3,95 | 0,34 |
| 900 | 15,18 | -2,06 | -3,13 | 12,63 | -2,30 | -4,04 | 11,58 | -3,93 | 0,35 |
| 1200 | 15,17 | -1,98 | -2,78 | 12,41 | -2,24 | -3,28 | 11,53 | -3,66 | 0,41 |
| 1440 | 15,02 | -1,94 | -2,63 | 12,20 | -2,19 | -3,16 | 11,39 | -3,65 | 0,80 |

Color de arándanos a 60°C

| 60°C | Control 1 | | | Control 2 | | | Control 3 | | |
|---------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| t (min) | L* | a* | b* | L* | a* | b* | L* | a* | b* |
| 0 | 15,15 | -1,52 | -2,04 | 13,64 | -6,13 | -2,89 | 13,75 | -6,68 | -1,48 |
| 60 | 15,01 | -1,51 | -2,04 | 13,49 | -6,13 | -2,81 | 13,64 | -6,58 | -1,27 |
| 120 | 14,96 | -1,51 | -2,04 | 13,41 | -5,92 | -2,78 | 13,58 | -6,44 | -1,03 |
| 180 | 14,96 | -1,42 | -2,03 | 13,33 | -5,80 | -2,68 | 13,38 | -6,41 | -0,93 |
| 240 | 14,75 | -1,40 | -2,00 | 13,21 | -5,79 | -2,58 | 13,64 | -6,19 | -0,83 |
| 360 | 14,73 | -1,38 | -2,00 | 13,11 | -5,69 | -2,55 | 13,50 | -6,06 | -0,67 |
| 600 | 14,67 | -1,36 | -1,99 | 12,90 | -5,68 | -2,54 | 13,58 | -5,79 | -0,54 |
| 900 | 14,58 | -1,33 | -1,99 | 12,90 | -5,59 | -2,54 | 13,08 | -5,74 | -0,52 |
| 1200 | 14,40 | -1,32 | -1,97 | 12,88 | -5,52 | -2,48 | 13,06 | -5,73 | -0,52 |
| | Ultrasonido 1 | | | Ultrasonido 2 | | | Ultrasonido 3 | | |
| 0 | 15,84 | -0,37 | -1,06 | 14,54 | -5,11 | -1,79 | 14,53 | -5,73 | -0,09 |
| 60 | 15,68 | -0,29 | -0,74 | 14,07 | -4,71 | -1,57 | 14,51 | -5,01 | 0,01 |
| 120 | 15,64 | -0,25 | -0,67 | 14,04 | -4,59 | -1,47 | 14,35 | -5,00 | 0,47 |
| 180 | 15,44 | 0,05 | -0,59 | 13,91 | -4,53 | -1,42 | 14,18 | -4,80 | 0,51 |
| 240 | 15,42 | 0,20 | -0,58 | 13,60 | -4,53 | -1,33 | 14,15 | -4,77 | 0,52 |
| 360 | 15,31 | 0,21 | -0,56 | 13,45 | -4,35 | -1,23 | 14,05 | -4,36 | 0,52 |
| 600 | 15,30 | 0,28 | -0,52 | 13,29 | -4,32 | -1,16 | 13,65 | -4,29 | 0,65 |
| 900 | 14,85 | 0,38 | -0,45 | 13,28 | -4,19 | -1,10 | 13,36 | -3,89 | 0,77 |
| 1200 | 14,59 | 0,49 | -0,40 | 13,05 | -3,98 | -0,98 | 13,26 | -3,89 | 1,20 |
| | Escaldado 1 | | | Escaldado 2 | | | Escaldado 3 | | |
| 0 | 15,53 | -0,56 | -1,88 | 13,97 | -4,87 | -2,88 | 14,34 | -5,35 | -0,66 |
| 60 | 15,39 | -0,24 | -1,88 | 13,90 | -4,70 | -2,71 | 14,24 | -5,02 | -0,60 |
| 120 | 15,22 | -0,14 | -1,58 | 13,84 | -4,66 | -2,47 | 14,15 | -4,93 | -0,48 |
| 180 | 15,17 | -0,12 | -1,54 | 13,72 | -4,64 | -2,31 | 14,05 | -4,88 | -0,43 |
| 240 | 15,12 | -0,05 | -1,41 | 13,70 | -4,54 | -2,26 | 13,87 | -4,82 | -0,24 |
| 360 | 15,11 | 0,07 | -1,38 | 13,52 | -4,47 | -2,13 | 13,82 | -4,74 | -0,14 |

| | | | | | | | | | |
|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 600 | 14,95 | 0,13 | -1,27 | 13,29 | -4,47 | -2,03 | 13,80 | -4,61 | -0,14 |
| 900 | 14,75 | 0,23 | -1,13 | 12,95 | -3,91 | -1,64 | 13,41 | -4,36 | -0,08 |
| 1200 | 14,69 | 0,42 | -1,07 | 12,89 | -3,87 | -1,62 | 13,41 | -3,92 | -0,03 |

Color de arándanos a 70°C

| 70°C | Control 1 | | | Control 2 | | | Control 3 | | |
|---------|---------------|-------|------|---------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| t (min) | L* | a* | b* | L* | a* | b* | L* | a* | b* |
| 0 | 12,91 | -3,68 | 0,67 | 13,99 | -2,18 | -1,10 | 13,80 | -3,97 | -0,56 |
| 60 | 12,87 | -3,60 | 0,84 | 13,95 | -2,15 | -0,95 | 13,74 | -3,93 | -0,49 |
| 120 | 12,84 | -3,58 | 0,93 | 13,87 | -2,15 | -0,93 | 13,61 | -3,64 | -0,40 |
| 180 | 12,24 | -3,56 | 0,94 | 13,72 | -2,10 | -0,88 | 13,55 | -3,46 | -0,37 |
| 240 | 12,15 | -3,36 | 1,04 | 13,49 | -2,08 | -0,79 | 13,31 | -3,31 | 0,47 |
| 360 | 12,09 | -2,82 | 1,04 | 13,35 | -2,08 | -0,60 | 12,91 | -3,30 | 0,52 |
| | Ultrasonido 1 | | | Ultrasonido 2 | | | Ultrasonido 3 | | |
| 0 | 13,62 | -2,58 | 2,16 | 14,88 | -1,04 | 0,20 | 14,82 | -2,53 | 0,43 |
| 60 | 13,15 | -2,49 | 2,17 | 14,54 | -0,72 | 0,27 | 14,64 | -2,45 | 0,56 |
| 120 | 13,07 | -2,48 | 2,21 | 14,27 | -0,56 | 0,34 | 14,50 | -2,33 | 0,94 |
| 180 | 12,98 | -1,98 | 2,28 | 13,81 | -0,38 | 0,35 | 14,19 | -2,05 | 1,02 |
| 240 | 12,52 | -1,92 | 2,68 | 13,75 | -0,37 | 0,93 | 13,90 | -2,03 | 1,73 |
| 360 | 12,10 | -1,26 | 2,81 | 13,57 | -0,27 | 1,21 | 13,69 | -1,48 | 2,17 |
| | Escaldado 1 | | | Escaldado 2 | | | Escaldado 3 | | |
| 0 | 13,16 | -2,43 | 1,00 | 14,87 | -1,11 | -1,09 | 14,25 | -2,30 | -0,40 |
| 60 | 13,02 | -2,30 | 1,06 | 14,84 | -0,87 | -0,17 | 14,23 | -2,23 | -0,26 |
| 120 | 13,00 | -1,88 | 1,23 | 14,39 | -0,70 | -0,12 | 13,80 | -2,20 | 0,08 |
| 180 | 12,62 | -1,79 | 1,30 | 14,32 | -0,65 | -0,12 | 13,75 | -2,13 | 0,22 |
| 240 | 12,40 | -1,75 | 1,49 | 14,27 | -0,34 | -0,08 | 13,68 | -1,81 | 0,82 |
| 360 | 12,30 | -1,34 | 1,52 | 13,82 | -0,32 | 0,31 | 13,45 | -1,69 | 0,90 |