



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Estudios Superiores
Cuautitlán

**Efecto del secado a vacío y vacío asistido
con ultrasonido en cubos de manzana
(*red delicious*)**

Tesis

Que para obtener el título de:

Ingeniero en Alimentos

Presenta:

Jose Luis Miguel Olivares

Asesores:

Dra. Rosalía Meléndez Pérez

Dr. José Luis Arjona Román

Cuautitlán Izcalli, Estado de México, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE

ATN: L.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Tesis

Efecto del secado a vacío y vacío asistido con ultrasonido en cubos de manzana (rod delicious).

Que presenta el pasante: Jose Luis Miguel Olivares

Con número de cuenta: 413114769 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 22 de Enero de 2019.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	L.Q.I. José Oscar German Ibarra	
VOCAL	Dra. Rosalía Meléndez Pérez	
SECRETARIO	L.A. María Guadalupe López Franco	
1er. SUPLENTE	M. en C. Araceli Ulloa Saavedra	
2do. SUPLENTE	M. en C. Jonathan Coria Hernández	

NOTA: los sindicales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCT/cga*

Dedicatorias

A Dios por haberme brindado salud y permitido llegar hasta este punto

A las personas más maravillosas del mundo, mi papa Vicente y mi mama Minerva que con su esfuerzo y dedicación hicieron posible este sueño y principalmente por el respaldo que me brindaron día con día ya que sin ellos no hubiese logrado esta meta.

A mi hermano Fabian por a verme fomentado a culminar mis estudios y por todo el apoyo brindado durante la carrera.

A mis hermanas Reyna, Erika y Marisol por ser esas hermanas que necesitaba y por su apoyo en cada etapa de mi vida.

A mi abuela Hermelinda por el cariño brindado y a mi abuela Dominga que tuvo que partir antes de que culminara esta etapa de mi vida, sin duda alguna este logro va dedicado especialmente para ella ya que desde pequeño me cuido y me enseñó cosas buenas de la vida, me hubiera gustado poder compartir este logro con ella, pero sé que donde quiera que este, estará contenta por mí, le agradezco de todo corazón todos los años que me cuido y estuvo a mi lado incondicionalmente y por todas esas cosas que compartió conmigo.

A mis abuelos Juan y Emiliano, que estén donde estén, sé que han estado a mi lado siempre y han cuidado de mi para lograr esta meta.

A Arianna por haber sido parte importante durante la carrera, por brindarme su apoyo incondicional y por ayudarme cuando lo necesitaba y por todo el cariño que me ha brindado.

Agradecimientos

A mis asesores, la Dra. Rosalía Meléndez Pérez y el Dr. José Luis Arjona Román por su paciencia durante el taller, así como durante la realización de la tesis y por las sugerencias realizadas en el trabajo.

Al Dr. Jonathan por la ayuda brindada y por esos pequeños consejos que me brindo durante esta etapa.

A los sinodales por haberse tomado la molestia de revisar este trabajo y por sus observaciones realizadas.

Al equipo (Brenda, Sabeli y Zoraida) por esas tardes mágicas cuando me las encontraba saliendo de la escuela y por hacer de las clases en los que coincidimos fueran más divertidas.

A mi amiga Ale por compartir buenos momentos y por el apoyo brindado, Les y Any por los buenos tiempos.

A mis compañeras Katia, Lau, Lupita y Gaby por las clases divertidas que pasamos.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán por abrirme las puertas y brindarme las facilidades para concluir mis estudios.

A los profesores de la facultad que cada uno apporto su granito de arena para mi aprendizaje, e hicieron de mí una persona perseverante

A todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron a hacer posible esto.

A los proyectos UNAM-DGAPA PAPIIT Clave IT 201417 y PIAPI 1820.

Índice general

Índice de Figuras	III
Índice de Tablas	IV
Resumen	V
Introducción	VI
Capítulo 1: Antecedentes	1
1.1. Secado de los alimentos	2
1.1.1. Secado a vacío	5
1.1.2. Transferencia de masa en el secado	8
1.1.2.1. Mecanismos de transferencia de masa	8
1.1.3. Curva de secado	11
1.1.4. Factores que afectan el proceso	13
1.2. Ultrasonido	13
1.2.1. Tipos y aplicaciones.....	14
1.2.2. Parámetros ultrasónicos importantes.....	15
1.2.3. Efectos en alimentos.....	17
1.2.4. Ventajas y limitaciones del ultrasonido	19
1.3. Color.....	21
1.3.1. Medición de color	22
1.3.2. Sistema de color CIELAB.....	23
1.3.3. Factores que afectan el color en alimentos.....	25
1.4. Textura	26
1.4.1. Dureza	30
1.5. Características generales de la manzana red delicious.	31

1.5.1. Producción y consumo	31
1.5.2. Composición química y propiedades	32
Justificación	34
Capítulo 2: Metodología experimental	35
2.1. Objetivo general	36
2.1.1. Objetivo particular 1	36
2.1.2. Objetivo particular 2	36
2.2. Diagrama de flujo experimental	37
2.3. Metodología	38
2.3.1. Caracterización de la materia prima	38
2.3.2. Objetivo particular 1	38
2.3.3. Objetivo particular 2	39
2.3.4. Determinación de humedad	40
2.3.5. Determinación de velocidad de secado	41
2.3.6. Determinación de color interno	41
2.3.7. Determinación de dureza	42
2.3.8. Energía consumida	42
Capítulo 3: Resultados y análisis	43
3.1. Curvas de secado.	44
3.2. Velocidad de secado.	49
3.3. Perfil de color	54
3.4. Dureza	56
3.5. Energía consumida	63
Conclusiones y recomendaciones	64
Referencias bibliográficas	66

Índice de figuras

Figura 1. Estructura celular del tejido de manzana	3
Figura 2. Secado térmico de un material alimenticio sólido.	10
Figura 3. Curva de secado	11
Figura 4. Modos de propagación de las ondas de ultrasonido, longitudinal y transversal.	16
Figura 5. Propagación de una onda de ultrasonido	16
Figura 6. Espacio de color CIELAB.	24
Figura 7. Grafica general del análisis del perfil de textura.....	28
Figura 8. Diagrama de flujo experimental del secado de cubos de manzana.....	37
Figura 9. Montaje experimental del secado de cubos de manzana.....	39
Figura 10. Curva de secado a vacío y vacío asistido con ultrasonido a 40 °C.....	44
Figura 11. Curva de secado a vacío y vacío asistido con ultrasonido a 60 °C.....	45
Figura 12. Curva de secado a vacío y vacío asistido con ultrasonido a 40 y 60 °C.	46
Figura 13. Pérdida de humedad en cubos de manzana.	48
Figura 14. Velocidad de secado a 40 °C a vacío y VUS.....	50
Figura 15. Velocidad de secado a 60 °C a vacío y VUS.....	51
Figura 16. Velocidad de secado a 40 y 60 °C a vacío y VUS.	52

Figura 17. Diferencia total de color (ΔE^*).	55
Figura 18. Dureza de cubos de manzana frescos.....	56
Figura 19. Cambios en dureza de cubos de manzana a 60 °C con VUS.	57
Figura 20. Dureza a vacío y VUS a 40 °C al final del proceso.....	58
Figura 21. Dureza de manzana a vacío y VUS a 60 °C al final del proceso.	59
Figura 22. Dureza de manzana a diferentes condiciones de secado.	60
Figura 23. Análisis estadístico de la dureza en cubos de manzana.	62

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros del análisis de perfil de textura	29
Tabla 2. Muestra la composición química de la manzana	32
Tabla 3. Valores promedio de la diferencia total de color (ΔE^*).	54
Tabla 4. Energía consumida durante el secado de cubos de manzana.	63

Resumen

El secado es uno de los métodos de conservación más utilizados para extender la vida útil de los productos. La deshidratación de manzanas es una práctica frecuente, ya que son parte de numerosos alimentos preparados, incluyendo preparaciones de refrigerios, así como alimentos integrales para el desayuno. El secado a vacío asistido con ultrasonido (VUS) ha cobrado mucha importancia ya que tiene efectos positivos en los productos obtenidos, además de que disminuye el tiempo de proceso.

El objetivo de este trabajo fue comparar el secado a vacío contra el VUS a 40 y 60 °C para determinar los efectos que se producen en la pérdida de humedad, color y dureza en cubos de manzana (red delicious), determinando la velocidad de secado. La manzana se seleccionó de acuerdo con el estado de madurez, calibre y que estuvieran libre de daños. Los cubos median $11 \pm 1 \text{ mm}^3$, el vacío se mantuvo constante a 15 cmHg y el ultrasonido aplicado fue de 40 kHz de frecuencia. El tiempo de proceso máximo fue de 4 horas.

Se observó que cuando se combina el secado a vacío con ultrasonido, existe mayor pérdida de humedad y aumenta la velocidad de secado tanto a 40 como a 60 °C, en comparación con solo vacío. Si bien el ultrasonido aceleró la tasa de remoción de humedad el efecto más importante fue la temperatura, ya que a una mayor temperatura se tuvo mayor pérdida de humedad para ambos métodos utilizados.

Con respecto al color se observó que la temperatura influyó en esta propiedad, ya que a 60 °C se tuvieron mayores cambios en ΔE^* . La aplicación del ultrasonido redujo la acción de la enzima con lo cual se tuvo menor oscurecimiento enzimático. La dureza no se vio afectada significativamente con la aplicación de ultrasonido a 40 °C, ya que los valores obtenidos tanto para el secado a vacío y VUS fueron similares. Sin embargo, a 60 °C se observó mayores cambios en esta propiedad. La temperatura de secado fue la que influyó en los cambios en la dureza.

Introducción

La manzana es una fruta fresca y dulce, se destaca en ensaladas frescas y crujientes. También se destina a la elaboración de néctares, jugos, vinagre, té, sidras, refrescos, licores, aguardiente, yogures, para dar sabor a postres, helados y pasteles. Aporta 12.3% aproximadamente de carbohidratos y es una fuente importante de fibra (1.8%).

Todos los alimentos tienden a deteriorarse química y microbiológicamente durante el almacenamiento debido a su alta actividad de agua, lo que influye negativamente en el valor nutricional y las propiedades sensoriales del producto, así como en la formación de compuestos perjudiciales. Por lo tanto, varios métodos han sido mejorados como métodos de preservación para extender su vida útil.

El secado es uno de esos métodos de conservación que disminuye el peso y volumen, lo que resulta en ahorros en costos de envase, transporte y almacenamiento, permite flexibilidad en la disponibilidad de estos productos, independientemente de la temporada.

El secado de manzanas es una práctica frecuente, ya que estas son parte de numerosos alimentos preparados, incluyendo preparaciones de refrigerios, así como alimentos integrales para el desayuno. Sin embargo, esta tecnología sigue teniendo un gran desafío para eliminar el agua de forma más eficiente, con un impacto mínimo sobre el medio ambiente y bajos costos operativos del proceso (Sabarez, 2016).

El secado convectivo común de los productos agrícolas se asocia con una calidad del producto no uniforme, baja eficiencia y costos operativos relativamente altos (Bonazzi & Dumoulin, 2011). Por lo tanto, una de las mejores soluciones para superar estos efectos negativos es utilizar un proceso a baja temperatura o reducir el tiempo de tratamiento mediante la aplicación de nuevas técnicas de procesamiento (Aguilera, Chiralt & Fito, 2003).

Hoy en día, la idoneidad de los métodos de secado depende de la calidad, por lo que el secado a vacío, que presumiblemente reduce los tiempos de procesamiento y permite reducir la exposición al oxígeno, puede representar una técnica adecuada para desarrollar productos ricos en vitaminas con alto contenido de sólidos naturales (Demarchi, Irigoyen, Giner, 2018), ya que es adecuado para productos que son propensos al daño por calor (Giri & Prasad, 2007).

El secado a vacío asistido con ultrasonido (VUS) ha cobrado mucha importancia en la deshidratación de frutas y vegetales ya que tiene efectos positivos en las propiedades del producto seco. El vacío remueve humedad mientras previene la oxidación o exposiciones que pueden ocurrir cuando ciertos compuestos reaccionan con el oxígeno del aire. La aplicación del ultrasonido controla estos cambios, además de acelerar el proceso, mejorar la calidad del producto y garantizar la duración de los productos. Este trabajo se orienta al estudio del secado a vacío y VUS en cubos de manzana, para evaluar el efecto en la pérdida de humedad, color y dureza durante el proceso.

Capítulo 1: Antecedentes

En este capítulo se presentará una descripción del secado en los alimentos, en donde se mencionará el secado a vacío, la transferencia de masa que ocurre durante el secado de los alimentos, así como los mecanismos involucrados, la curva típica de secado, las partes de esta y los factores que afectan el proceso.

Después se abordará el ultrasonido partiendo desde los tipos empleados en la industria alimentaria, los parámetros importantes, efectos en alimentos, así como las ventajas y limitaciones.

Una vez concluido el tema anterior se pasará al color, el cual incluye la medición del color, el sistema CIELAB y los factores que afectan el color.

También se presentará la textura en los alimentos, en los que se incluye la dureza.

Por último, se darán a conocer las características generales de la manzana red delicious, los cuales incluyen la producción, consumo, la composición química y las propiedades de esta.

1.1. Secado de los alimentos

El secado es una de las operaciones unitarias importantes en la fabricación de alimentos destinada a reducir la cantidad de humedad en los productos alimenticios a niveles que aseguren la preservación al inhibir la actividad microbiana, enzimática y el deterioro de la calidad del producto asociado. En términos básicos, el proceso de secado implica la eliminación de agua de una materia prima húmeda al inducir cambios de fase del agua en el sólido en una fase de vapor mediante la aplicación de calor (Sabarez, 2015; Sabarez, 2016).

Numerosos productos alimenticios se conservan mediante el secado, tal es el caso de las frutas y verduras (Jangam, 2011). Las principales ventajas son la vida útil prolongada del producto y la disponibilidad fuera de temporada, la reducción de los costos de embalaje, almacenamiento, manipulación y transporte (Moses *et al.*, 2014). La principal desventaja es que se trata de un proceso de uso intensivo de energía que representa aproximadamente el 12-20% en la industria manufacturera. Otra preocupación es la calidad del producto definida en términos de aspectos nutricionales, funcionales y sensoriales (Bernaert *et al.*, 2018; Kowalski, 2016).

El secado de los alimentos implica fenómenos simultáneos de transferencia de calor, masa y procesos de transferencia de momento que ocurren junto con cambios físicos y químicos (Sabarez, Gallego & Riera, 2012), en matrices de los alimentos que dependen de la estructura y la composición (Demarchi, Irigoyen & Giner, 2018). En el transcurso del proceso, las propiedades del producto se alteran, como el color, la estructura del tejido, la morfología (Ben, Benali & Queslati, 2012), el volumen de la muestra disminuye y el área superficial también se contrae simultáneamente debido a la pérdida de humedad (Koua, Koffi & Gbaha, 2017). Estos cambios pueden ser deseables, pero también perjudiciales para la calidad general del producto y dependen en gran medida de los métodos aplicados, el tiempo total de tratamiento, la temperatura utilizada y otros ajustes paramétricos de las condiciones de procesamiento.

En particular, el secado de manzanas provoca una serie de cambios, como la oxidación, el oscurecimiento enzimático, la contracción, el ablandamiento y la pérdida de las propiedades nutricional-funcionales (Beck *et al.*, 2014).

Los materiales alimenticios (por ejemplo, frutas, verduras) son generalmente medios porosos que contienen matrices sólidas que tienen espacios vacíos que se llenan con gas o líquido (Prakotmak, 2013). La manzana es una de estas frutas altamente porosa y contiene diferentes entornos celulares (intracelular, intercelular y pared celular) con varias cantidades de agua en estos entornos.

El agua intracelular (ICW) es el que se encuentra dentro de una célula, y el que está en una región rodeada por dos o más células, se conoce como agua intercelular o libre (FW) como se muestra en la Figura 1. El agua que está dentro de la pared celular se conoce como agua de pared celular.

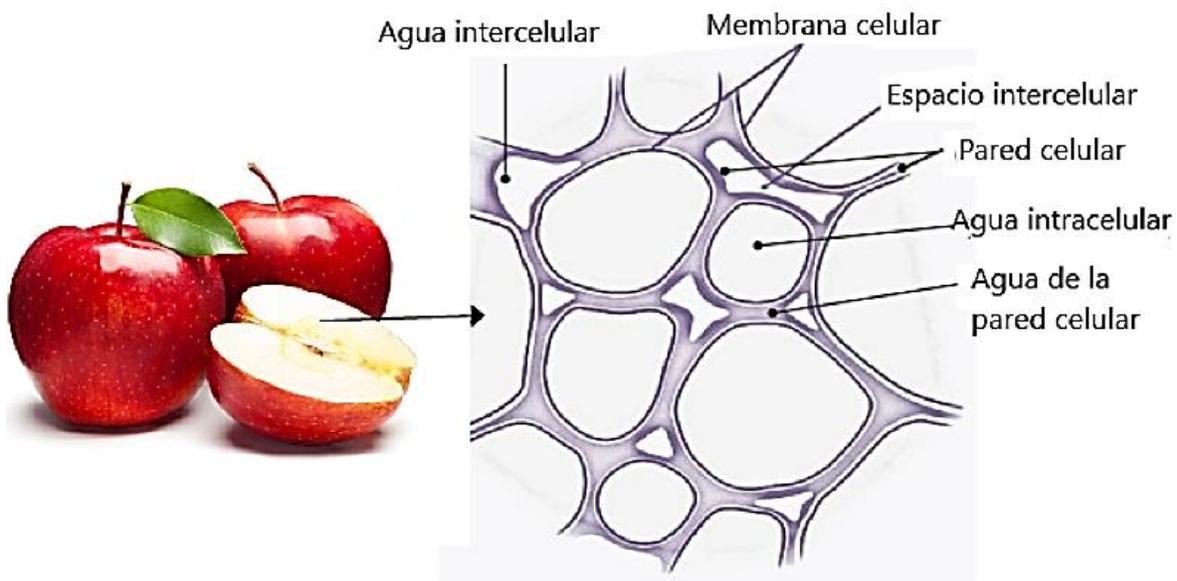


Figura 1. Estructura celular del tejido de manzana (Khan, Nagy & Karim, 2018).

De acuerdo con las resistencias de unión, ICW, FW y agua de pared celular a veces se denominan agua débilmente ligada (LBW), agua capilar y agua fuertemente ligada (SBW), respectivamente. Se argumenta que la mayor parte de la humedad (aproximadamente 80-90%) en el tejido de manzana está presente en espacios intracelulares (dentro de la matriz sólida) (Khan, Nagy & Karim, 2018).

El transporte del agua celular tiene un efecto significativo sobre el comportamiento morfológico del material alimenticio durante el secado. El agrietamiento o la contracción como resultado del secado se inician a nivel celular. La migración de FW tiene un efecto mínimo en la calidad de los alimentos; mientras que la migración de ICW resulta en la contracción celular, la formación de poros y el colapso de la estructura celular y de poros, y por lo tanto tiene un efecto importante en la calidad de los alimentos principalmente en la textura (Joardder *et al.*, 2016). Además, la contracción (resultados de la ruptura celular) no solo degrada la calidad del material alimenticio seco, sino que también influye en la cinética de secado debido a los cambios en la superficie de secado y al establecimiento de gradientes de presión dentro del material alimenticio (procesos de transferencia de masa). En este contexto, la comprensión del mecanismo de migración de ICW es crucial para la predicción precisa del calor y masa reales durante el secado del material alimenticio (Dincer, Ozalp & Zamfirescu, 2015).

La ICW se puede migrar de dos maneras diferentes: vías intracelulares (transporte sintomático, como se mencionó anteriormente) y vías extracelulares. Cuando la ICW se transporta desde los espacios intracelulares a las vías intercelulares a través de la ruptura de la membrana celular; se define como vías extracelulares y el proceso se denomina proceso de transporte apoplástico (Khan & Karim, 2017).

La humedad se puede remover por:

Evaporación. Esta ocurre cuando la presión del vapor del agua en la superficie del sólido es igual a la presión atmosférica. Esto se debe al aumento de la temperatura del agua hasta el punto de ebullición. Si el material es sensible al calor, la temperatura a la cual ocurre la evaporación puede disminuirse bajando la presión (evaporación a vacío).

Vaporización. El secado se lleva a cabo por convección, pasando aire caliente sobre el alimento. El aire es enfriado por el producto y la humedad es transferida hacia el aire. En este caso la presión del vapor del agua sobre el sólido es menor que la presión atmosférica.

1.1.1. Secado a vacío

La palabra vacío es usada para describir un amplio intervalo de condiciones, se refiere a un espacio sin materia o más específicamente a un espacio en el que el aire u otros gases están ausentes. Por otro lado, es cualquier gas o aire a presión menor que la atmosférica. La propiedad básica involucrada es la densidad del gas. La ciencia de la ingeniería abarca un enorme intervalo de densidades de los gases, de 15 órdenes de magnitud, es decir de un billón de veces.

Si bien con el vacío se remueve aire u otros gases, estos no pueden ser removidos completamente, la cantidad a remover depende de la aplicación.

Hay diferentes clases de vacío, los cuales son:

- Bajo: $10^5 > P > 3.3 \times 10^3$
- Medio: $3.3 \times 10^3 > P > 10^{-1}$
- Alto: $10^{-1} > P > 10^{-4}$
- Muy alto: $10^{-4} > P > 10^{-7}$

P = Pascales

Los líquidos volátiles, incluyendo el agua evaporarían a una velocidad muy alta si no existiera una atmosfera en nuestro planeta. Normalmente el agua y otros fluidos evaporan lentamente porque, la evaporación de las moléculas puede regresar dentro del fluido después de chocar con moléculas de aire de la superficie del líquido. La temperatura de ebullición de un líquido es reducida si el líquido es colocado a vacío. El agua ebulle a temperaturas más bajas si se somete a presiones inferiores a la atmosférica.

El secado a vacío es una operación unitaria, en el que el material húmedo se seca bajo presiones subatmosféricas (presión inferior a cero). La presión más baja permite que se reduzca la temperatura de secado y se obtenga una calidad más alta que con el proceso convencional de aire a presión atmosférica. La eliminación de la humedad de los productos alimenticios tiene lugar a baja presión (Pinedo & Murr, 2006; Wu *et al.*, 2007), el calor es añadido indirectamente por el contacto con

una pared de metal o por radiación. La aplicación de vacío expande el aire y el vapor, creando una estructura porosa en los alimentos y, por lo tanto, aumenta su relación de área / volumen para acelerar la transferencia de calor y masa (Dincer & Erbas, 2018). Los alimentos habitualmente utilizados son productos biotecnológicos sensibles a la temperatura (Pinedo & Murr, 2007), como frutas y verduras (Giri & Prasad, 2007).

El secado a vacío es un método con alta velocidad porque la presión de vapor del aire en el producto es menor que la del aire atmosférico y el vapor de agua se elimina mediante una bomba de vacío. Las características de esta técnica, con alta velocidad, baja temperatura y un ambiente deficiente en oxígeno, permiten reducir las reacciones bioquímicas adversas, como el deterioro de la oxidación, las reacciones de pardeamiento. Además, mejora los atributos de calidad, tales como la forma, el color, el aroma, el sabor y el valor nutricional del producto seco (Artnaseaw, Theerakulpisut, & Benjapiyaporn, 2010; Wang *et al.*, 2018).

El secado de los alimentos se produce a temperaturas más bajas debido a que, el punto de ebullición del líquido eliminado durante el proceso disminuye en el vacío. Los productos sensibles al calor u oxígeno, como las manzanas, pueden beneficiarse particularmente por este método. Por lo tanto, las temperaturas deben mantenerse en un mínimo durante el proceso de producción para que se puedan producir alimentos deshidratados de alta calidad (Baslar *et al.*, 2016).

El contenido de humedad disminuye con el aumento de la porosidad, por lo que la porosidad de las frutas y verduras aumenta durante el secado. Por ejemplo, los productos alimenticios deshidratados a vacío como las papayas, los plátanos y las manzanas tienen mayor porosidad que los alimentos deshidratados convencionalmente (Kudra & Mujumdar, 2009). Esta técnica permite productos finales con un mejor sabor, menos higroscópicos y pérdidas mínimas de estos productos (Baslar *et al.*, 2016).

Se han llevado a cabo investigaciones experimentales empleando esta técnica en materiales sensibles al calor como cubos de zanahoria (Devahastin *et al.*, 2004), calabaza (Pinedo & Murr, 2006), berenjenas (Wu *et al.*, 2007), arándanos

(Gunasekaran, 1999) y trozos de plátano (Thomkapanich, Suvarnakuta & Devahastin, 2007).

Si bien este método es recomendable en productos sensibles al calor, no generalmente para todos los alimentos es adecuado, ya que es una operación con altos costos de mantenimiento (Ratti, 2009). Otra desventaja es que la transferencia de calor no es fácil en el vacío (Chen & Mujumdar, 2008), debido a que, la transferencia de energía térmica se vuelve difícil ya que la convección es ineficaz a baja presión (Giri & Prasad, 2007). Por otro lado, un proceso continuo no se puede ejecutar tan fácilmente.

Los defectos del alimento deshidratado pueden reducirse, pero el secado a vacío no puede proporcionar suficiente eliminación de humedad desde el centro de las muestras a la superficie, por lo que, puede provocar una fuerte pendiente de humedad en la capa superficial de las muestras (Baslar *et al.*, 2016). Por lo cual, puede requerir pretratamiento o combinación con otros métodos para mejorar la eficiencia del proceso.

En los últimos años se ha empleado en combinación con el ultrasonido de potencia, que permite aumentar la eliminación de humedad fuertemente adherida en los alimentos. La técnica de secado a vacío asistido con ultrasonido es una técnica novedosa para el secado de alimentos el cual fue informada por primera vez por Baslar *et al.* (2014). Se basa en una combinación de tratamiento ultrasónico y vacío para acortar el tiempo de procesamiento. El vacío crea una presión ambiental que es mucho menor que la presión atmosférica y, por lo tanto, evapora el agua a bajas temperaturas. Además, aumenta la velocidad de secado al acelerar la pérdida de humedad. El tratamiento ultrasónico, ayuda a la transferencia de calor y acelera la eliminación de agua desde el interior a la superficie del material mediante el uso de ondas acústicas (Baslar, klichy & Yalinkilic, 2015). Baslar *et al.* (2014) informaron que el tiempo de secado de la carne de res y pollo se redujo a porcentajes que van del 8% al 37% y del 10% al 42%, dependiendo de la temperatura utilizada. Además, se informó que la energía consumida disminuyó marcadamente en esta novedosa técnica para carnes de res y pollo a 65 y 75 ° C, en comparación con el secado a

vacío o al horno. Sin embargo, se necesita más investigación sobre el efecto en los parámetros de calidad sensorial, visual y bioquímica de los alimentos.

1.1.2. Transferencia de masa en el secado

La transferencia de masa requiere la presencia de dos regiones con composiciones químicas diferentes y se refiere al movimiento de especies químicas desde una región de alta concentración hacia una de concentración menor. La fuerza impulsora primaria para la transferencia de masa es la “diferencia de concentración”. La transferencia de masa puede ocurrir en los líquidos y en los sólidos, al igual que en los gases (Cengel, 2007).

1.1.2.1. Mecanismos de transferencia de masa

El proceso de secado de los materiales alimenticios es extremadamente complejo e involucra mecanismos simultáneos de transferencia de calor (desde el medio de secado al material alimenticio) y masa (transporte de agua desde el interior del producto sólido hasta su superficie). En la transferencia de calor se suministra el calor latente de vaporización o sublimación del agua mientras que en la transferencia de masa se da el movimiento del agua a través del alimento y arrastre de vapor de agua del entorno del alimento. Las propiedades que se transportan (calor y materia) lo harán en condiciones estacionarias en el seno del gas, pero en condiciones no estacionarias en el seno del sólido (Sabarez, 2015; Xue, 2004). Existe también un fenómeno de transporte de cantidad de movimiento en el seno del aire, ya que se tiende a conseguir una gran turbulencia (Fito *et al.*, 2001).

El alimento sometido a secado es en general un sistema trifásico (matriz sólida, fracción líquida y fracción gaseosa) pueden distinguirse varios mecanismos de transporte de materia según la fase a través de la cual se produce el transporte y según se trate de agua líquida, agua líquida más solutos o vapor de agua. Por otro lado, en el seno del aire de secado también tiene lugar transporte de agua en forma de vapor por mecanismo turbulento (Xue, 2004).

Los principales mecanismos de transporte de agua en los alimentos son: difusión del líquido debido a gradientes de concentración, difusión del vapor debido a la presión

parcial de vapor, movimiento del líquido por fuerzas capilares, flujo de Knudsen, movimiento del líquido por fuerza de gravedad, y difusión superficial (Sabarez, 2015).

El movimiento del agua en el interior de los sólidos durante el secado se da principalmente por (García, 2007):

- El flujo capilar. Es un mecanismo de transporte que ocurre en sólidos muy húmedos, donde los capilares se encuentran llenos de agua. Las fuerzas capilares determinan el movimiento del agua en estado líquido en el interior de los poros. Se considera el mecanismo responsable del transporte del agua a la superficie saturada que tiene lugar en la etapa de velocidad de secado constante.
- Difusión del líquido en los poros. El agua puede difundir en el interior de los capilares rellenos de agua y de los poros. Este tipo de difusión se denomina habitualmente “difusión ordinaria” y se produce cuando el diámetro del poro es mucho mayor que el paso libre de las moléculas que difunden.
- Difusión superficial. La difusión superficial es la difusión del agua a lo largo de la superficie de las paredes de los poros y de los capilares.
- Flujo hidráulico en los poros. Este flujo aparece cuando hay un gradiente de presión en los poros y su dirección es hacia donde la presión sea menor.

El movimiento de agua a través del alimento depende tanto de su estructura como de las interacciones del agua con la matriz alimentaria. Por lo general, el mecanismo de difusión de agua tiene mayor importancia en sólidos de una fase con estructura coloidal, y el mecanismo de capilaridad en el caso de productos granulares. En muchos casos, ambos mecanismos ocurren en una sola operación de desecación. (Xue, 2004). Sin embargo, los mecanismos de transferencia más importantes en el interior del sólido son la difusión de agua en forma vapor o en fase líquida y la capilaridad (Contreras, 2006).

El flujo de un líquido a través de los intersticios y sobre la superficie de un sólido debido a la atracción molecular entre el líquido y el sólido se denomina **capilaridad**.

La **difusión** se da en sólidos de estructura fina y en los capilares, poros y pequeños huecos llenos con vapor. Para régimen transitorio, la ecuación de la difusión de un componente es la siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Donde se muestra la variación de la concentración (C) en el transcurso del tiempo (t) y D, que es la difusividad del agua a través del sólido en m^2/s (Fito *et al.*, 1998).

En la Figura 2 se ilustra una representación conceptual de los fenómenos de transporte que ocurren durante el secado de un material alimenticio sólido (Sabarez, 2015).

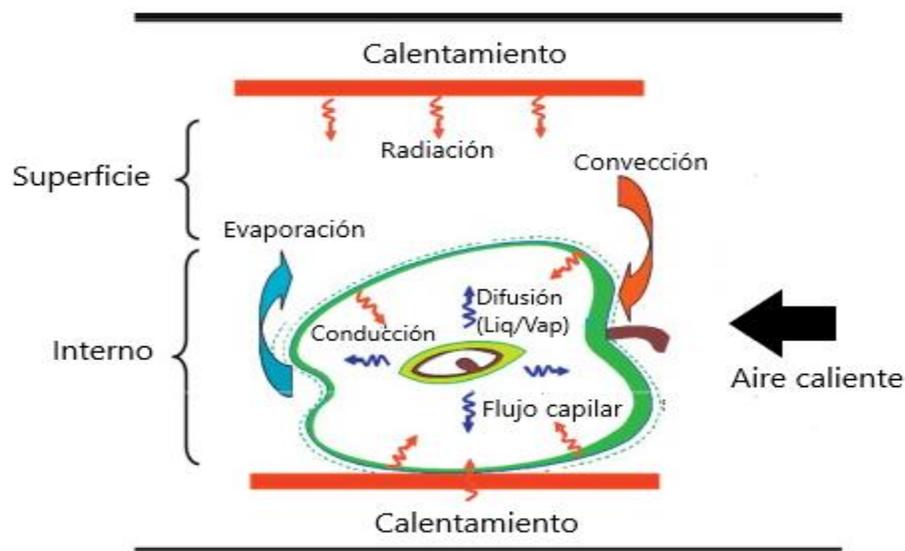


Figura 2. Secado térmico de un material alimenticio sólido (Sabarez, 2015).

Para secar el alimento se necesita suministrar energía para generar un cambio de fase de líquido a vapor (o de un sólido a otro) y para activar el movimiento molecular. Para el caso de la Figura 2, el aire caliente (el medio de secado más común) se emplea para suministrar calor (por convección), desde el medio de secado al alimento y como gas portador para eliminar la humedad por evaporación de esta. El calor también puede suministrarse por conducción (es decir, desde superficies metálicas calientes como fuente de calor) o por radiación. En todos los casos la humedad se eliminará por difusión y por flujo capilar como ya se mencionó antes,

los cuales son los dos principales mecanismos y se darán a través de los poros del alimento una vez que se haya suministrado energía calorífica.

1.1.3. Curva de secado

La curva de secado es la evolución en el contenido de humedad del producto en el transcurso del tiempo (Figura 3). Gráficamente se representa como el contenido en humedad del material con respecto al tiempo transcurrido desde que se inicia la operación de secado (Xue, 2004).

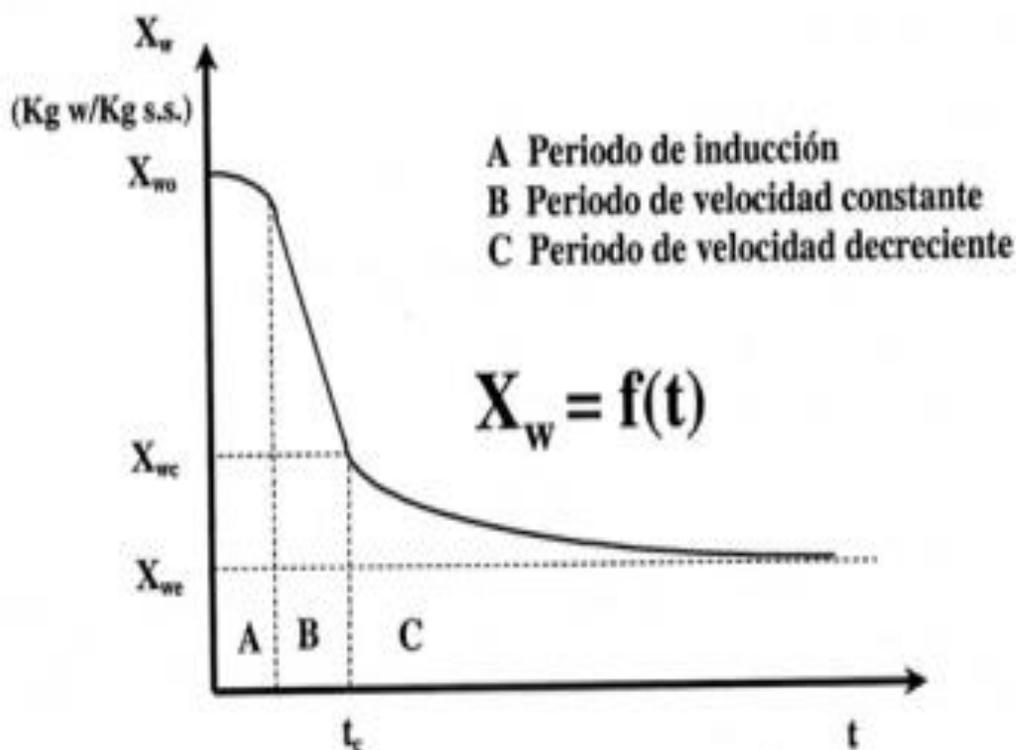


Figura 3. Curva de secado (Fito *et al.*, 2001).

La eliminación de agua de un alimento se realizará normalmente en una serie de etapas diferenciadas entre sí por la velocidad de secado, como se muestra en la Figura 3, en la que se observan tres zonas características (Fito *et al.*, 2001; García, 2007; Singh & Heldman, 2009):

- Una primera zona A, en la cual la pendiente de la curva aumenta ligeramente con el tiempo y se denomina periodo de inducción. El cual ocurre conforme el producto y el agua contenida se calientan ligeramente.

- Otra B, conocida como periodo de velocidad constante. Donde se produce una reducción importante del contenido de agua. Esta etapa tiene lugar a temperatura constante. En la mayoría de los casos esta etapa finalizará al alcanzarse la humedad crítica. La transferencia del agua se realizará por difusión a través del interfaz sólido/aire. La resistencia a la transferencia de calor o materia está localizada en la fase fluida. La velocidad del proceso será constante si las condiciones de secado no cambian.
- Y una tercera zona C (periodo de velocidad de secado decreciente) en la cual la pendiente disminuye con el tiempo, donde existirán uno o varios periodos de velocidad de secado decreciente. Esta empieza a disminuir una vez que la superficie del sólido deja de estar saturada, es decir, aparecen zonas secas. La velocidad de secado transcurrirá a la misma velocidad que en el periodo de velocidad constante en las zonas saturadas y disminuirá en las zonas secas, con lo que la velocidad de secado global disminuirá. La humedad crítica suele estar claramente identificada debido al cambio brusco de la pendiente en la curva. En esta etapa la evaporación se da desde el interior del sólido y ocurre hasta que no se pueda retirar más humedad.

Se define velocidad de secado como la velocidad con que disminuye la humedad del producto, es decir:

$$V_s = -\frac{dH}{dt} \quad (2)$$

Donde:

V_s = Velocidad de secado.

dH / dt = Diferencia del contenido de humedad con respecto al tiempo.

Por lo tanto, la pendiente de la curva de secado (dH / dt) nos da la velocidad de secado.

1.1.4. Factores que afectan el proceso

El tipo de alimento es un factor muy importante, ya que sus propiedades físicas y químicas juegan un papel importante durante el tratamiento, debido a los posibles cambios que puedan ocurrir y al efecto de estos cambios en la eliminación del agua del producto (Ibarz, 2005).

La densidad de los alimentos juega un papel muy importante en la rapidez con que la humedad se mueve a través del producto, cuanto más denso es el producto, mayor es la resistencia a que la humedad se desplace.

El área de la superficie del producto: generalmente se subdivide lo máximo posible el producto, a fin de aumentar el área de transferencia de masa y calor y acelerar el proceso.

La temperatura y tiempo: la velocidad de secado aumenta al aumentar la temperatura, y, por tanto, el tiempo disminuye (Xue, 2004).

En el secado a vacío la presión empleada es otro factor de gran importancia, ya que a presiones altas el alimento requerirá menos tiempo de proceso en comparación con una presión baja, además esta influye en la calidad final del producto.

Otros factores importantes son la geometría y el espesor del alimento a secar. Así como la cantidad, ya que puede afectar la eficiencia del equipo. Además, el método a utilizar es muy importante ya que puede influir de forma negativa o positiva en las propiedades finales del producto. Por lo tanto, al realizar la deshidratación de un alimento es importante considerar todos estos factores.

1.2. Ultrasonido

Es una forma de radiación no ionizante que usa ondas de sonido de alta frecuencia (Powles & Martin, 2018), como las vibraciones del aire, ondas mecánicas propagadas en sólidos, líquidos y gases distintos del aire (McClements, 1995). En otras palabras, el ultrasonido se define como ondas de sonido que tienen una frecuencia que excede el límite auditivo del oído humano, en general > 20 kHz (Awad *et al.*, 2012; Chandrapala, 2012).

Las ondas de ultrasonido son una forma de energía vibratoria producida por transductores ultrasónicos que convierten la energía eléctrica en energía vibratoria de sonido. Los transductores ultrasónicos también son capaces de convertir ondas de sonido en energía eléctrica y están disponibles en diferentes tamaños y frecuencias dependiendo de la aplicación (Mason & Peters, 2002).

1.2.1. Tipos y aplicaciones

El ultrasonido en la industria alimentaria ha sido objeto de investigación y desarrollo. Las aplicaciones se basan en tres métodos diferentes: Aplicación directa al producto, acoplamiento con el dispositivo y sumergido en un baño ultrasónico (Chemat, Huma, & Khan, 2011).

En las industrias de procesamiento de alimentos se hace una distinción entre ultrasonido de baja potencia o alta frecuencia (frecuencia de entre 2 y 10 MHz con una intensidad $< 1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) y de alta potencia o baja frecuencia, en el que la frecuencia es de 20 a 100 kHz y la intensidad $10 < I < 1000 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ (Awad *et al.*, 2012; Mamvura & Ivuke, 2018).

El intervalo de frecuencia adecuado para aplicaciones de conservación y procesamiento de alimentos varía de 20 a 1000 kHz. Las ondas de ultrasonido de alta frecuencia no causan ningún efecto físico o químico mínimo sobre los alimentos y, por lo tanto, se emplean para la evaluación no destructiva de la calidad de los alimentos. Mientras que el ultrasonido de alta potencia emplea ondas de alta intensidad que inducen efectos sobre las propiedades físicas, mecánicas y químicas / bioquímicas de los alimentos (Ojha & Tiwari, 2018).

El ultrasonido de baja potencia se ha usado para evaluar la composición de productos cárnicos crudos y fermentados, pescado y aves de corral. También se utiliza para el control de calidad de verduras y frutas frescas, procesamiento de quesos, aceites, pan y productos de cereales, productos alimenticios a granel y basados en grasas emulsionadas, geles alimenticios, alimentos aireados y congelados (Awad *et al.*, 2012).

El ultrasonido de alta potencia, se ha utilizado como alternativa a las operaciones de procesamiento de alimentos para controlar la microestructura, modificar las características de textura de los productos, propiedades funcionales de diferentes proteínas alimentarias, inactivación o aceleración de la actividad enzimática, inactivación microbiana, congelación, descongelación, liofilización, concentración y para facilitar la extracción de diversos alimentos y componentes bioactivos (Gallego, Rodríguez & Acosta, 2010). También se ha aplicado durante el secado de diferentes productos, como frutas o verduras, y ha demostrado ser muy eficaz para acortar el tiempo de secado. Los efectos del ultrasonido en la transferencia de masa son principalmente mecánicos, con un efecto térmico leve (Gallego *et al.*, 2007).

1.2.2. Parámetros ultrasónicos importantes

Características de onda

El sonido es una onda mecánica que causa perturbación en un medio, transfiriendo energía de un punto a otro en un sistema. A medida que la onda de sonido viaja a través de un medio, la energía se propaga a través de colisiones de partículas adyacentes que oscilan alrededor de su posición de descanso sin desplazamiento neto. Las ondas de sonido pueden ser longitudinales o transversales (Figura 4) dependiendo de la dirección de sus oscilaciones en relación con la dirección de la energía que viaja a través del medio. Solo en sólidos se pueden propagar ondas de sonido transversalmente, mientras que todos los materiales pueden soportar una onda longitudinal. (Powles & Martin, 2018).

En el modo longitudinal, el desplazamiento de las partículas se produce en la misma dirección que la propagación de la onda, mientras que en la transversal el desplazamiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Las ondas de ultrasonido se caracterizan por parámetros como la frecuencia (f), la longitud de onda (λ) y la amplitud o intensidad (A) (García *et al.*, 2010).

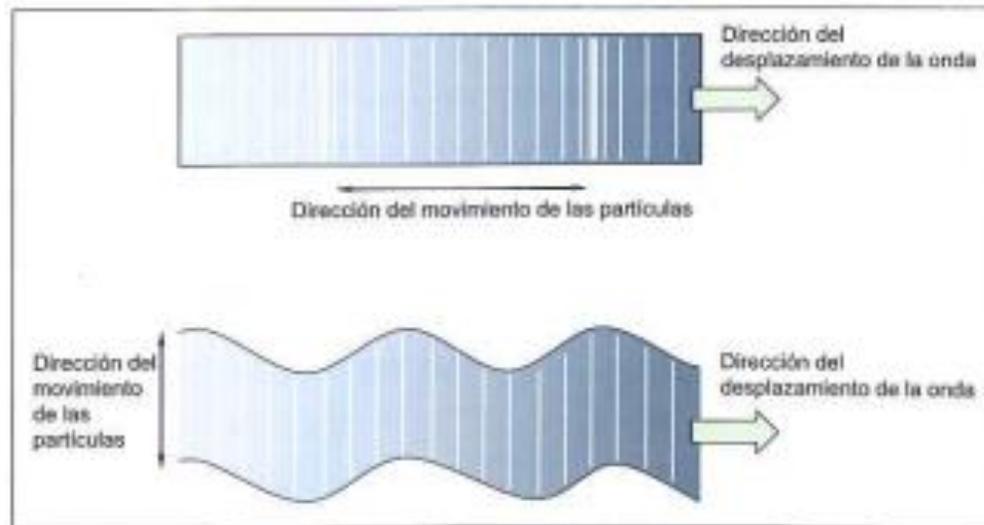


Figura 4. Modos de propagación de las ondas de ultrasonido, longitudinal y transversal (García *et al.*, 2010).

La **frecuencia** de una onda de sonido (medida en Hertz, Hz) es el número de oscilaciones (o ciclos) por segundo. Si una partícula completa una oscilación por segundo, su frecuencia es de 1 Hz.

La **longitud de onda** (Figura 5) es la distancia recorrida por el sonido en un ciclo. Es inversamente proporcional a la frecuencia, es decir, cuanto más corta es la longitud de onda, más alta es la frecuencia (Powles & Martin, 2018).

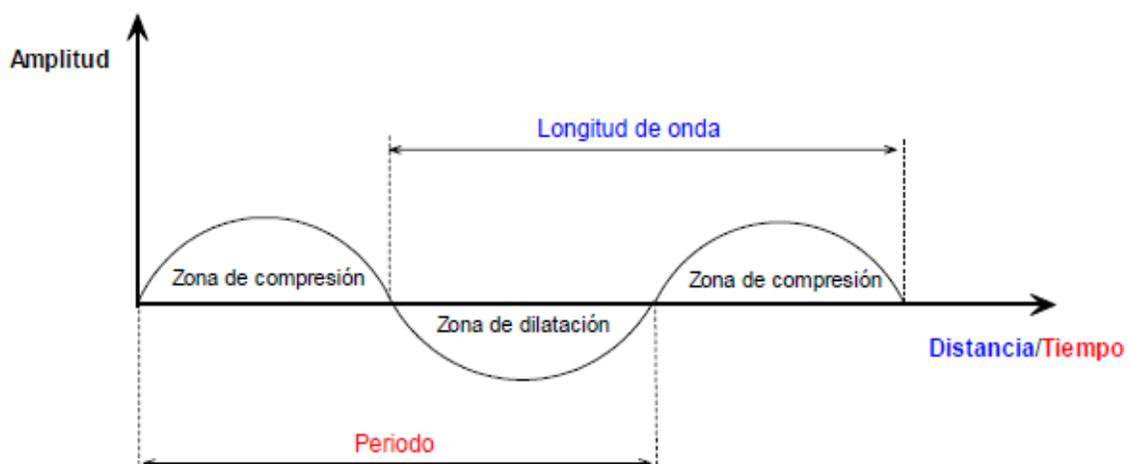


Figura 5. Propagación de una onda de ultrasonido (García, 2007).

Amplitud

La amplitud de onda (Figura 5) es el máximo desplazamiento de la partícula desde la posición de equilibrio (García, 2007).

1.2.3. Efectos en alimentos

El ultrasonido induce efectos mecánicos, químicos y bioquímicos a través de la producción y posterior colapso de las burbujas de cavitación (Mason & Peters, 2002).

La cavitación puede clasificarse en acústica, hidrodinámica, óptica y de partículas, según el modo de generación. Solo las cavitaciones acústicas e hidrodinámicas pueden generar las intensidades necesarias para inducir cambios químicos y físicos en diferentes sistemas alimentarios como carbohidratos, proteínas y lípidos (Awad *et al.*, 2012).

Los efectos físicos del ultrasonido son dominantes en el intervalo de frecuencia más bajo de 20-100 kHz con un mayor nivel de cavitación transitoria, mientras que los efectos químicos son dominantes de 200-500 kHz debido a la generación de gran cantidad de burbujas activas. La transmisión acústica es dominante a frecuencias más altas (> 1 MHz) con menos efectos físicos y químicos asociados con la cavitación. La transmisión acústica es una fuerza física del sonido debido a un gradiente de presión que es capaz de desplazar iones y moléculas pequeñas (Feng, Barbosa & Weiss, 2011).

El umbral de cavitación o Blake se define como la presión acústica más baja a la que se observa la formación de burbujas. A frecuencias más altas, las presiones acústicas son más bajas y, por lo tanto, rara vez se produce la cavitación. Mientras que, a bajas frecuencias, son posibles ondas de ultrasonido de altas presiones acústicas, por lo tanto, se observa cavitación. Para optimizar el uso del ultrasonido de potencia para aplicaciones alimentarias, es necesario determinar la cantidad apropiada de energía acústica que se aplicará (Ojha & Tiwari, 2018).

La cavitación surge de los ultrasonidos que se transmiten en un ciclo alterno positivo y negativo. Estas cavidades a menudo crecen como resultado de un proceso

conocido como difusión rectificada, con lo que los gases volátiles que ya están presentes en el medio ingresan a las cavidades, pero no se expulsan por completo durante la siguiente fase de compresión (Mason, Chemat & Ashokkumar, 2015). A medida que estas cavidades crecen, eventualmente se vuelven inestables y colapsan (Paniwnyk, 2017). Este ciclo de presión facilita el crecimiento y la contracción de la microburbuja. Cuando la frecuencia de la burbuja coincide con la frecuencia de la onda ultrasónica, las microburbujas estallarán rápidamente en la etapa de compresión y liberarán una gran energía donde ocurre un aumento breve y localizado de la temperatura hasta varios miles de Kelvin y presiones de hasta varios cientos de bares. La alta presión (alrededor de 100 MPa) da como resultado la ruptura de la membrana celular, la caída de las partículas de la superficie sólida, el daño de la microestructura, incluyendo H^+ , OH^- y el peróxido de hidrógeno producido (Cao & Zhang, 2018; Leighton, 1998).

La cavitación acústica y la transmisión acústica son los principales efectos del ultrasonido para la mejora de la transferencia de calor y masa. Existen otros efectos posteriores, como el "efecto de calentamiento" debido a la disipación de la energía mecánica y el "efecto de esponja" debido a las compresiones y expansiones alternativas generadas por las ondas ultrasónicas. El efecto de calentamiento puede aumentar la tasa de evaporación de humedad, reducir la capa límite de difusión, aumentar la transferencia de masa y acelerar la difusión. El efecto esponja (series rápidas de ciclos de expansión y compresión alternados) produce la liberación de líquido desde la parte interna de la partícula a la superficie sólida, y las fuerzas involucradas en este mecanismo pueden ser más altas que la tensión superficial que mantiene las moléculas de agua dentro de los capilares del material, creando canales microscópicos y facilitando los intercambios de materia, retirando la humedad fuertemente adherida. Desde un punto de vista general, todos estos efectos producidos por ultrasonido podrían ser interesantes en aplicaciones que involucran calor o transporte masivo, disminuyendo tanto la resistencia externa como la interna al transporte (Fan & Zhang, 2017; Yao, 2016).

La cavitación es la principal causa del aumento de la permeabilidad celular y, por lo tanto, del aumento de la transferencia de masa. Durante este fenómeno, el colapso

de las burbujas tiene la capacidad de perforar los orificios a través de los poros en los tejidos de las plantas. A una frecuencia de ultrasonido fija, a medida que aumenta la potencia de ultrasonido, aumenta el número de burbujas de cavitación, lo que aumenta la fuerza de corte debido al colapso de más burbujas (Yilmaz & Bilek, 2018).

La formación y el comportamiento de la burbuja de cavitación sobre la propagación de las ondas acústicas constituyen los eventos esenciales que inducen la mayoría de los efectos acústicos. La cantidad de energía liberada por cavitación depende de la cinética del crecimiento de la burbuja y el colapso de las burbujas. Esta energía debería aumentar con la tensión superficial en la interfaz de la burbuja y disminuir con la presión de vapor del líquido. En particular, los alimentos hidratados tienen una tensión superficial comparativamente alta, por lo que puede ser un medio muy efectivo para la cavitación (Knorr *et al.*, 2004).

1.2.4. Ventajas y limitaciones del ultrasonido

Los estudios han demostrado ventajas de las tecnologías de ultrasonido, especialmente en el procesamiento de alimentos. Estas tecnologías consisten en secado asistido por ultrasonido, tratamiento con ultrasonido, deshidratación osmótica asistida por ultrasonido, congelación asistida por ultrasonido y microorganismos de inactivación ultrasónica (Cao & Zhang, 2018). Una de las ventajas, especialmente con fines analíticos, es su acción rápida, precisa y no invasiva. Además, puede usarse en sistemas condensados y ópticamente no transparentes (Nowacka, 2012).

El ultrasonido ofrece una ventaja neta en términos de productividad, rendimiento y selectividad, con un mejor tiempo de procesamiento, mejor calidad, menos riesgos químicos y físicos, y es respetuoso con el medio ambiente (Chemat, Huma & Khan, 2011). Su aplicación durante el secado ha demostrado mejorar la calidad de los alimentos secos debido a su carácter no térmico, además, el tiempo de secado puede reducirse al aplicar temperaturas más bajas, lo cual es adecuado en productos que contienen sustancias termolábiles (Chen, Guo & Wu, 2016).

Tiene efectos mínimos sobre la degradación de parámetros como el color y los compuestos fenólicos totales, los flavonoides, ácido ascórbico, turbidez y en la capacidad antioxidante (Rojas *et al.*, 2016; Sun *et al.*, 2015).

La fuerza mecánica y los efectos físicos y químicos de la cavitación por ultrasonido pueden eliminar la humedad fuertemente adherida a los materiales alimenticios, deformar los alimentos porosos y crear canales microscópicos, mejorando así la transferencia de masa durante el secado (Tao *et al.*, 2016).

La aplicación de ultrasonidos interrumpe la continuidad de las membranas y, por lo tanto, aumenta la velocidad de transferencia de masa entre la célula y su entorno extracelular (Baslar *et al.*, 2014). Se supone que las vibraciones mecánicas, la creación de microcanales en la matriz de los alimentos o la imposibilidad de colapsar estos canales al secarse, son los responsables de la eliminación más rápida del agua (Beck *et al.*, 2014).

En la mayoría de los casos, el beneficio en alimentos incluye un aumento en la vida útil a través de la reducción de microorganismos indeseables y también mejora la estabilidad del producto durante el almacenamiento (Ojha & Tiwari, 2018).

Santacatalina *et al.* (2016) observaron que el efecto de la aplicación de ultrasonido de potencia redujo el tiempo de secado en manzanas. Bantle & Eikevik (2011) informaron un aumento del 14.6% en el coeficiente de difusión. Mientras tanto, García *et al.* (2012) lograron un aumento en la difusividad efectiva de alrededor del 400% durante el secado de manzanas, zanahorias y berenjenas.

Kowalski, Mierzwa, & Stasiak (2016) observaron que la aplicación de ultrasonido acelera significativamente el secado convectivo en manzanas. Schössler, Jäger & Knorr (2012) reportaron que en el secado por convección de manzana y pimienta roja mejoró las propiedades de los productos secos, además minimizó el consumo de energía. Mientras que en zanahoria redujo el tiempo total de secado en aproximadamente un 30% a 40 °C, aumentó el coeficiente de transferencia de masa y la difusividad efectiva de la humedad, independientemente de la densidad de carga de masa utilizada (Cárcel *et al.*, 2011). Mientras que Gamboa *et al.* (2014) obtuvieron una disminución en el tiempo de secado en fresas de 13 a 44%.

Uno de los principales problemas en el uso del ultrasonido en el procesamiento de alimentos es la modificación controlada de la funcionalidad de los ingredientes alimentarios sin modificación química (Ashokkumar *et al.*, 2008).

En otros casos afecta la calidad de los productos ya que se genera un daño en la estructura durante la aplicación de esta tecnología (Cao & Zhang, 2018). Además, debido al estrés que se genera por los remolinos de las ondas de choque (efectos mecánicos) causa la inactivación de los productos liberados (Lateef, Oloke & Prapulla, 2007).

También conduce a la formación de radicales como resultado de las condiciones críticas de temperatura y presión que son responsables de los cambios en los compuestos alimenticios. Los radicales (H^+ y OH^-) producidos en la superficie de la burbuja de cavitación que estimulan las reacciones de cadena radical que implican la formación de productos de degradación y producen defectos de calidad considerables en el producto (Majid, Nayik & Nanda, 2015).

1.3. Color

La percepción del color es un fenómeno muy complejo que depende de la composición del objeto en su entorno de iluminación, las características de la percepción del ojo y el cerebro, y los ángulos de iluminación y visión. Es una respuesta mental perceptual al espectro visible de la luz reflejada o emitida por un objeto. Dicha señal de respuesta interactúa con el ojo y la retina, y luego se transmite al cerebro por el nervio óptico, lo que hace que la persona asigne colores a esta señal (Meléndez, Vicario & Heredia, 2005).

Es un atributo sensorial importante para proporcionar la información de calidad básica para la percepción humana, y está estrechamente relacionado con factores de calidad como frescura, madurez, variedad, conveniencia y seguridad alimentaria, y por lo tanto es un importante factor de clasificación para la mayoría de los productos alimenticios (León *et al.*, 2006; Wu & Sun, 2013). Al ser el primer parámetro de calidad evaluado por los consumidores, este influye en las elecciones y comportamiento de compra de estos (Nisha, Singhal & Pandit, 2011; Wang *et al.*, 2018).

El color de los alimentos se rige por los cambios químicos, bioquímicos, microbianos y físicos que ocurren durante el crecimiento, la maduración, la manipulación y el procesamiento. También es un indicador de la severidad del procesamiento térmico y puede usarse para predecir el deterioro de la calidad correspondiente causado por la exposición al calor (Pathare, Opara & Al-Said, 2013).

Los alimentos, que no tienen color propio como dulces, postres, snacks, bebidas y productos de alta tecnología de reciente aparición en el mercado se colorean artificialmente para hacerlos más atractivos al consumidor. El color artificial de los alimentos ayuda en muchos casos a definirlos. La experiencia ha demostrado que las personas, cuando no vemos el color, tenemos problemas para identificar los sabores (Rodríguez, 2009).

En la práctica, debido a que el consumidor generalmente asocia un sabor agradable con un color atractivo, muchos alimentos se comercializan en paquetes transparentes. Para mantener la calidad, el color de los productos alimenticios debe medirse y estandarizarse (Labell, 1993).

1.3.1. Medición de color

Las mediciones pueden realizarse mediante evaluación visual (humana) y análisis instrumental como colorímetros, los cuales pueden cuantificar los atributos de color fácilmente (Wu & Sun, 2013).

El color está sujeto a la percepción. Diferentes personas interpretan las expresiones de color de muchas maneras diferentes. Por lo tanto, la expresión subjetiva puede no ser lo suficientemente precisa como para comunicar este atributo. Los enfoques objetivos en la medición y expresión del color contribuyen a minimizar los problemas relacionados con la comunicación de este, entre los procesadores y los compradores, lo cual sería mucho más simple y exacta. En el caso de la medición instrumental, se expresa por medio de coordenadas. Puede determinarse instrumentalmente utilizando colorímetros o espectrofotómetros (Lee, 2000).

Colorímetros como el Minolta, Hunter Lab y los colorímetros del Dr. Lange se utilizan para medir el color de las fuentes primarias de radiación que emiten luz y fuentes

secundarias de radiación que reflejan o transmiten luz externa (León *et al.*, 2006 ; Meléndez, Vicario & Heredia, 2005). Por lo tanto, los valores triestímulo se obtienen ópticamente, no matemáticamente. Su medida es rápida y simple (Oliveira & Balaban, 2006).

Los colorímetros simulan la respuesta de solo un observador estándar y un iluminante estándar, por lo que los valores obtenidos difieren en función del aparato utilizado. Con base en los tres tipos de conos en la retina del ojo humano, los instrumentos de medición del color se han desarrollado con tres filtros que funcionan como cada uno de los tres tipos de conos. Un colorímetro triestímulo tiene tres componentes principales: (1) fuente de iluminación, (2) combinación de filtros utilizados para modificar la distribución de energía de la luz incidente / reflejada y (3) detector fotoeléctrico que convierte la luz reflejada en una salida eléctrica.

Las mediciones hechas en un colorímetro triestímulo son normalmente comparativas. Por lo tanto, es necesario usar patrones calibrados de colores similares a los materiales a medir para lograr las mediciones más precisas. Estos instrumentos son los más utilizados en la medición del color de alimentos y otros productos, debido a su facilidad de uso e interpretación de datos (Pathare, Opara & Al-Said, 2013).

1.3.2. Sistema de color CIELAB

Según los conceptos de CIE, el ojo humano tiene tres receptores de color: rojo, verde y azul, y todos los colores son combinaciones de esos. Las cantidades de rojo, verde y azul necesarias para formar un color en particular se denominan valores triestímulo y se denominan X, Y y Z, respectivamente.

El espacio de color CIE $L^* a^* b^*$ (Figura 6) fue ideado en 1976 para proporcionar diferencias de color más uniformes en relación con la percepción humana de las diferencias (Sahin & Sumnu, 2006).

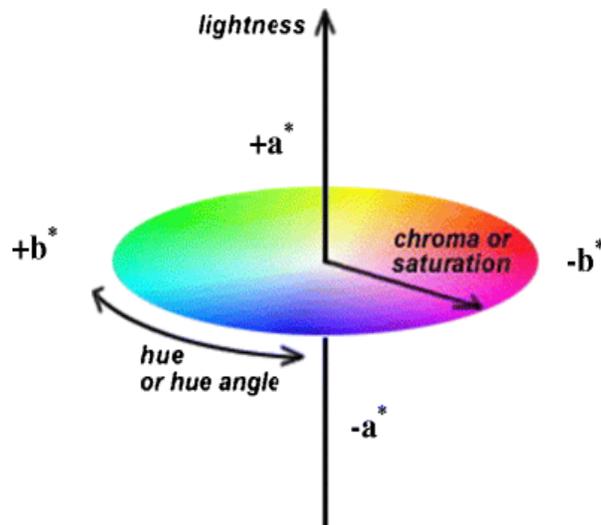


Figura 6. Espacio de color CIELAB (Pathare, Opara & Al-Said, 2013).

Se requiere un objeto, una fuente de luz o un iluminante, y un observador para la presencia de color. Una fuente de luz se puede encender y apagar y se puede usar para ver un objeto. Sin embargo, un iluminante es una descripción matemática de una fuente de luz. CIE recomendó tres iluminantes estándar.

El iluminante A define la luz típica de una lámpara incandescente, el iluminante B representa la luz solar directa y el iluminante C representa la luz diurna media del cielo total. El iluminante D representa la luz del día más completa y precisa de iluminantes B y C (Sahin & Sumnu, 2006). Mientras que los iluminantes E son para lámparas fluorescentes (MacDougall, 2002).

El espacio de color $L^* a^* b^*$, también referido como CIELAB, es actualmente uno de los espacios de color más populares y uniformes usado para evaluar el color de un objeto, en donde se considera un espacio uniforme en el que se miden dos coordenadas de color a^* y b^* , así como un índice psicométrico de luminosidad (L^*). El parámetro a^* toma valores positivos para color rojo y negativos para verde, mientras que b^* toma valores positivos para amarillo y negativos para azul. L^* es una medida aproximada de la luminosidad, que es la propiedad según la cual cada color se puede considerar equivalente a un miembro de la escala de grises, con valores entre 0 para el negro y 100 para el blanco (Granato & Masson, 2010).

Los cambios de color se pueden medir como el módulo del vector de distancia entre los valores iniciales y las coordenadas reales. Este concepto se llama diferencia de color total e indica la magnitud de la diferencia de color entre las muestras almacenadas y de control (Patras *et al.*, 2011). La diferencia de color total (ΔE^*) se calcula como (Rhim *et al.*, 1999):

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (3)$$

ΔL^* = (muestra L^* menos estándar L^*)

Δa^* = (muestra a^* menos estándar a^*)

Δb^* = (muestra b^* menos estándar b^*)

1.3.3. Factores que afectan el color en alimentos

Existen diversos factores que causan cambios en el color de los alimentos tales como:

- **Enzimas.** Ciertas enzimas están presentes de forma natural en los alimentos (enzimas oxidantes). Estas aceleran las reacciones químicas entre oxígeno y alimentos, lo que lleva a su descomposición. Uno de los principales efectos que causan es el pardeamiento de vegetales y frutas.
- **Luz.** Casi todos los alimentos están expuestos a la luz a partir de fuentes naturales o artificiales. Esta exposición puede dar lugar a cambios en el color del alimento, en el sabor o en pérdidas de vitamina. En la mayoría de los productos sólidos, la luz penetra en la capa exterior, por lo que el deterioro se produce en esta parte. En los líquidos, en cambio, la penetración suele ser mayor. La sensibilidad a la luz depende de factores como su intensidad, el tipo de luz, la distancia entre la fuente de luz y el alimento, la duración de la exposición o la concentración de oxígeno en el producto y la temperatura.
- **Temperatura.** Cuando la temperatura no se controla de forma adecuada, ya sea durante el almacenamiento o procesamiento, esta se relaciona directamente con las reacciones de oscurecimiento y por lo tanto se ve reflejado en los cambios en color del alimento. También el espesor del alimento, así como la tecnología de secado empleada son factores importantes en los cambios de color (Jaya & Das, 2003).

En el caso de las frutas y vegetales el color depende de la presencia de cuatro tipos fundamentales de pigmentos; carotenoides, antocianinas, clorofilas y compuestos fenólicos, los cuales pueden cambiar durante el procesado y almacenamiento. Por otra parte, en ciertos alimentos la aparición de coloraciones marrones frecuentemente indeseadas se asocia a reacciones de pardeamiento no enzimático (reacción de Maillard, propiciada por las altas temperaturas), pardeamiento de tipo enzimático y el producido por la caramelización de los azúcares, en la superficie del alimento. Todo esto puede afectar en forma negativa a la presentación y al sabor de los productos (Contreras, 2006).

Los cambios de color en manzanas se deben principalmente al oscurecimiento enzimático, el cual es causado por la actividad de la enzima polifenoloxidasa (PPO). Al ocurrir la ruptura de las células la enzima se pone en contacto con los sustratos fenólicos y en presencia de oxígeno inicia la reacción que conduce a la formación de quinonas, las que reaccionan entre sí con otros compuestos formando melaninas, que son complejos macromoleculares de color oscuro (Salazar, 2013). La velocidad y grado de pardeamiento depende también de la variedad (ya que diversas variedades contienen diferentes concentraciones y/o actividad de PPO o concentración de compuestos fenólicos), estado de madurez, presencia de oxígeno y comportamiento de las enzimas y sustratos (Galindo, 2011).

Diferentes estudios han concluido que la PPO en frutas como la manzana, se encuentra principalmente en el centro, y de forma secundaria cerca de la cascara. La PPO en esta fruta se ubica al interior de la célula en estado inmaduro, mientras en estado maduro se localiza en vacuolas (Valencia & Rodríguez, 2011).

1.4. Textura

La textura se refiere a la sensación humana que se percibe de un alimento derivada de su comportamiento reológico durante la masticación y deglución (Jurado, 2017).

La norma ISO 5492 (2008) define a la textura como un conjunto de propiedades mecánicas, geométricas y de superficie de un producto perceptible por receptores mecánicos, táctiles y en ciertos casos visuales y auditivos.

Esta juega un papel importante en la calidad del producto, y después del color es el parámetro crítico previo al consumo en el que se centra la atención al momento del almacenamiento, distribución y comercialización (Harker, Gunson & Triggs, 2006). Puede ser una razón importante para el rechazo y uno de los principales impulsores de la aversión de los alimentos (Jeltema, Beckley & Vahalik, 2016).

Los alimentos tienen diferentes propiedades de textura. Las cuales son causadas por diferencias inherentes debido a la variedad, madurez y por los métodos de procesamiento. La textura de los alimentos puede evaluarse mediante métodos sensoriales o instrumentales (Sahin & Sumnu, 2006).

Los instrumentos comprenden principalmente una celda de carga, un control deslizante motorizado y software de análisis. La celda de carga está conectada a un émbolo que toca y presiona al alimento y mide la fuerza de reacción durante la fractura. El instrumento recopila datos de fuerza de reacción de series de tiempo y extrae las características de estos datos a través del análisis de perfil de textura (Nakamoto, Nishikubo & Kobayashi, 2018).

La textura se considera una característica de rasgos múltiples que se compone de dos tipos fundamentales de componentes, tanto la evaluación mecánica (como la dureza y la elasticidad) como las características del sonido (como la frescura y lo crujiente).

El Análisis de perfil de textura (TPA) se ha utilizado comúnmente durante la evaluación de las propiedades mecánicas de la textura, donde estas propiedades se miden mediante la prueba de compresión y se representan mediante parámetros basados en el desplazamiento forzado (Zhao *et al.*, 2017).

En la Figura 7 se aprecia la gráfica general del perfil de textura, la cual se basa en la imitación de la masticación por medio de un Texturómetro el cual realiza una doble compresión, que al graficar la fuerza contra el tiempo lleva a la extracción de siete parámetros texturales medibles.

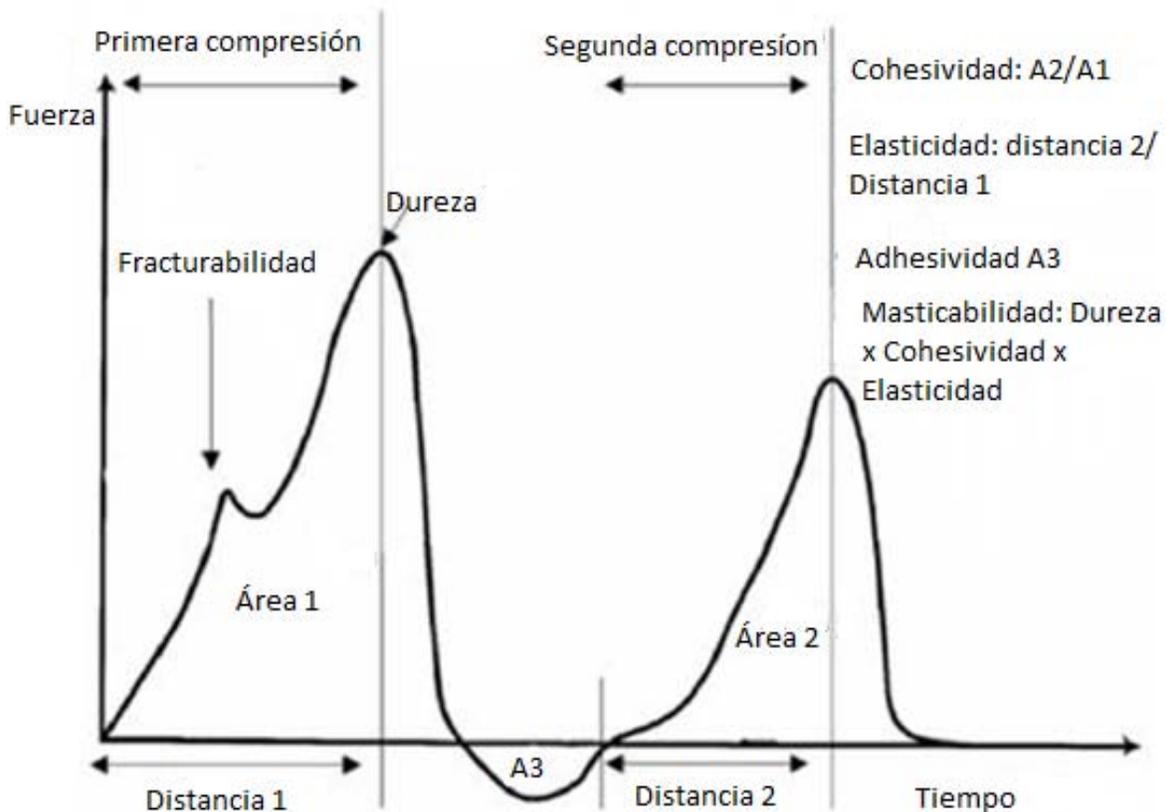


Figura 7. Grafica general del análisis del perfil de textura (Hleap & Velasco, 2010).

La dureza es el atributo de textura mecánica más importante en los alimentos; en el caso de las frutas, productos cárnicos y los derivados lácteos como el queso, junto con el sabor y la apariencia, constituyen las características en las que el consumidor basa su decisión al ingerirlos. En frutas, determina el grado de maduración en que esta se encuentra. En cuanto a los demás parámetros de textura, por lo general determinan el estado reológico que predomina en el alimento (Hleap & Velasco, 2010).

La Tabla 1 muestra los parámetros texturales que se pueden determinar del análisis de perfil de textura.

Tabla 1. Parámetros del análisis de perfil de textura (Torres, Gonzáles & Acevedo, 2014).

Parámetro	Definición	Determinación
Fracturabilidad	Fuerza necesaria para fracturar la muestra	Fuerza en la primera ruptura significativa de la muestra.
Dureza	Fuerza necesaria para lograr una deformación determinada	Máxima fuerza durante el primer ciclo de compresión
Adhesividad	Trabajo necesario para vencer la fuerza de atracción entre la muestra y una superficie	Máxima fuerza durante el primer ciclo de compresión
Cohesividad	“Fuerza” de los enlaces internos que mantiene la estructura de una muestra. Representa la resistencia de un material a una segunda deformación con relación a como este se comportó en un primer ciclo de deformación. Mide el trabajo realizado en la segunda compresión dividido entre el trabajo durante la primera compresión.	Relación entre el área positiva del segundo ciclo de compresión (A2) y el área positiva del primer ciclo (A1). Excluyendo la porción de áreas durante la descompresión de la muestra.
Elasticidad	Capacidad que tiene una muestra deformada para recuperar su forma o longitud inicial después de que la fuerza ha impactado en ella.	El cociente L2 /L1.
Gomosidad	Fuerza necesaria para desintegrar una muestra de alimento semisólido a un estado tal que facilite su ingesta.	Producto de la dureza y la Cohesividad
Masticabilidad	Fuerza necesaria para masticar un alimento sólido hasta un estado tal que permita su ingesta.	Producto de la dureza, Cohesividad y elasticidad.

La textura de los tejidos vegetales tiene su base en la estructura celular, de manera que existe un efecto combinado de la presión de turgencia de los componentes celulares y de la elasticidad de las paredes celulares lo que determina las propiedades viscoelásticas de los tejidos vegetales. Estas propiedades están también afectadas por la composición de la fracción péctica de la pared celular y especialmente por la fuerza de las uniones celulares a través de la lámina media y el grado de empaquetamiento celular. La fuerza de las uniones celulares y el nivel de turgencia son determinantes de su comportamiento mecánico (Chiralt *et al.*, 2001).

En la actualidad, los mayoristas de frutas emplean métodos instrumentales para medir la calidad de la manzana considerando atributos de apariencia (como forma, tamaño y color del fruto), propiedades químicas y atributos de textura. La dureza es uno de los parámetros más simples y más utilizados para evaluar la calidad de las manzanas (Zhao *et al.*, 2017).

1.4.1. Dureza

La dureza es la fuerza máxima que tiene lugar en cualquier tiempo durante el primer ciclo de compresión. Se refiere a la fuerza requerida para comprimir un alimento entre los molares o entre la lengua y el paladar. Se expresa en unidades de fuerza, N o kg m s^{-2} (Hleap & Velasco, 2010).

La dureza es una propiedad de textura muy importante de las frutas, ya que brinda información sobre la capacidad de almacenamiento y la resistencia a las lesiones de los productos durante la manipulación y el procesamiento. Además, este atributo de calidad se utiliza para describir las propiedades mecánicas de los tejidos de las frutas (Gálvez *et al.*, 2012).

Durante el secado se destruye la integridad de la plasmalema y la capacidad de la célula para mantener su turgencia. Esto da como resultado cambios en la pared celular, particularmente en la lámina media (el inicio de la rotura de la pectina conduce a la separación celular), así como otros cambios dependientes de la composición del producto como puede ser la gelatinización del almidón en el caso de que esté presente. La pérdida de agua y la exposición a altas temperaturas durante el proceso provocan el encogimiento celular y por consiguiente cambios en la dureza de los productos obtenidos. Por lo tanto, la dureza final depende de la importancia relativa de cada factor que contribuye a su textura y al grado con que ese factor se ha cambiado mediante el método de procesado utilizado (Contreras, 2006).

Gálvez *et al.* (2012) reportaron que la dureza en rodajas manzana durante el secado disminuyó entre 61-67% en comparación con las muestras frescas, lo que comprueba que este atributo se ve afectado durante el proceso. Contreras (2014) reportó que la dureza de la manzana fresca fue significativamente superior a las

muestras secas y posteriormente rehidratadas. Esto es debido a que, durante el procesamiento se produce una degradación de la estructura de la manzana.

Valencia & Rodríguez (2011) reportaron que los cambios en la dureza de las manzanas deshidratadas se deben a la temperatura utilizada. El cual, provoca un cambio en la solubilidad de las pectinas relacionado con un incremento de la fracción hidrosoluble y una disminución del oxalato soluble y de la pectina residual, lo que provocó que las muestras secas presentaran una menor dureza. Así que su determinación es importante después del secado.

1.5. Características generales de la manzana *red delicious*.

Existen más de 1,000 variedades de manzana. Las más conocidas en México son: *red delicious*, *Golden delicious*, Gala, Granny Smith y el Perón Golden (El poder del consumidor, 2016).

El árbol de manzana (*Malus domestica*) es conocido con el nombre de manzano. Su tronco es recto, su rama es en forma de sombrilla y sus hojas son ovaladas, las flores son de tonalidad entre blanco y rosa. Tiene una altura entre 1.5 a 7 metros aproximadamente, y da fruto por varias decenas de años con una producción de 130 kilos por cosecha. Es resistente al frío y no necesita tanta cantidad de calor y luz para su maduración (SIAP / SAGARPA, 2016).

La manzana *red delicious* es de forma de corazón, color rojo brillante y a veces tiene rayas, con tamaños medios de 160 a 240 gramos, de 70 a 85 mm de calibre. Conocida por tener una textura crujiente con un sabor ligeramente suave. Es una de las frutas más producidas en el mundo y más consumidas por el ser humano. Es fácil de cultivar y crece de la hoja caduca, la cual florece en primavera y dan su fruto en otoño (Benítez, 2011).

1.5.1. Producción y consumo

En cuanto a la producción, México se encuentra en el lugar número 20, en 2016 se produjeron 716,930 toneladas. Los principales estados productores son: Chihuahua, el cual aportó el 81.8% del volumen nacional recolectado, seguido a

distancia por Durango y Puebla con 5.9% y 5.2%, respectivamente. La cosecha de manzana se realiza entre diciembre y mayo, pero la época de mayor producción son los meses de agosto, septiembre y octubre. Casi la totalidad de la producción se destina al consumo humano, el cual es uno de los conceptos de mayor gasto en las familias mexicanas (SIAP / SAGARPA, 2017), consume no solo como fruta fresca sino también de manera procesada, como jugo y mermelada. Numerosos alimentos preparados, como tentempiés, cereales integrales para el desayuno, alimentos funcionales o alimentos instantáneos para bebés, contienen porciones de manzana seca (Santacatalina *et al.*, 2016).

1.5.2. Composición química y propiedades

La manzana, como cualquier fruto, es un organismo vivo y, por lo tanto, está expuesta a diversos factores que provocan múltiples cambios en su composición. Dichos factores pueden estar en función de la variedad genética, la temperatura y humedad relativa del ambiente, grado de madurez, condiciones de cultivo y almacenamiento. Está compuesta principalmente por agua, carbohidratos y en menor proporción de fibra, proteínas, lípidos y cenizas como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Muestra la composición química de la manzana (Benítez, 2011).

Composición química	(%)
Agua	85.30
Carbohidratos	12.30
Fibra	1.80
Proteínas	0.30
Cenizas	0.17
Lípidos	0.13

Esta fruta ha sido identificada como una de las principales fuentes dietéticas de fibra y compuestos fenólicos (Khanizadeh *et al.*, 2008), que tienen propiedades antioxidantes muy interesantes (Vrhovsek *et al.*, 2004). Los compuestos fenólicos ofrecen protección contra el cáncer, afecciones cardiovasculares y algunas enfermedades relacionadas con la edad (Sun *et al.*, 2014).

Entre los flavonoides destacan los flavonoles, catequinas y procianidinas, todos ellos con un gran poder antioxidante. Estos compuestos químicos reducen o previenen la oxidación, así evitan que células y tejidos sean dañados por los radicales libres del cuerpo. Dentro de los flavonoles, el más abundante en esta fruta es la quercetina, la cual tiene capacidad anticancerígena. En cuanto al ácido málico, este compuesto está implicado en el metabolismo y en la producción de energía del cuerpo, además de ser un agente quelante de metales (Contreras, 2014).

La fibra soluble, formada principalmente por pectina, ayuda a prevenir la formación de colesterol además de ralentizar la liberación de glucosa en el cuerpo. Por su parte, la fibra insoluble es capaz de regular el tránsito del intestino grueso (Salazar, 2013).

La histidina, funciona como vasodilatador que puede mejorar la hipertensión. El potasio ayuda a controlar la presión arterial y el ritmo cardiaco, y hasta combatir la anemia. También contiene quercetina, un antioxidante con efectos antihipertensivos y por ende brinda protección cardiovascular, además de proteger contra las cataratas. Además, diversos estudios indican que inhibe la proliferación de células cancerígenas. La manzana es una buena fuente de vitamina C, un poderoso antioxidante que se encuentra en gran parte en la cáscara de esta fruta (El poder del consumidor, 2016).

El calcio es un componente importante y ayuda a regular el metabolismo en las manzanas. La concentración adecuada de calcio mantiene la firmeza de la pulpa de la fruta y minimiza la incidencia de desórdenes fisiológicos tales como el núcleo acuoso y la descomposición interna (Ahmad *et al.*, 2018).

Justificación

Las ventajas del secado de los alimentos son bien conocidas como la reducción de la humedad en el producto, retarda el deterioro microbiano y químico, además se produce una reducción sustancial del volumen y aumenta la vida útil. Sin embargo, el método de secado a emplear es muy importante de acuerdo con el alimento a secar, ya que en la mayoría de los casos se tienen cambios indeseables en las propiedades del producto.

La manzana, por su valor nutritivo y sus características fisicoquímicas y organolépticas, ha sido objeto de investigación desde hace varios años. Sin embargo, durante el secado de esta se producen reacciones como el oscurecimiento enzimático, el cual es causado por la reacción del oxígeno con la enzima polifenoloxidasas. La cual se encuentra principalmente en el centro y de forma secundaria cerca de la cascara. Se sabe que los cambios de color, así como otras propiedades se ven afectados por el grosor del material, la temperatura aplicada, así como la tecnología de secado empleada.

El secado a vacío es un método alternativo adecuado para materiales sensibles al calor, como las frutas (Chen, Guo & Wu, 2016). Tiene la ventaja de obtener un menor tiempo de secado, utilizando baja temperatura y menos energía, y reduciendo la oxidación de los compuestos alimenticios mediante la eliminación de oxígeno durante el secado (Baslar, Kilicli & Yalinkilic, 2015). Por lo tanto, las cualidades sensoriales y nutricionales de los alimentos pueden mantenerse (Viera *et al.*, 2018). La aplicación de ultrasonido acelera la pérdida de humedad por la que la combinación de ambas tecnologías puede ser beneficioso en el secado de cubos de manzana.

Capítulo 2: Metodología experimental

En este capítulo se presenta la metodología utilizada en el secado de cubos de manzana.

Inicialmente se darán a conocer el objetivo general y los objetivos particulares, los cuales incluyen las variables (independiente, dependiente y de respuesta), así como los niveles de variación. Después se presenta el diagrama de flujo experimental utilizado.

También se presentará la metodología que se siguió en la caracterización de la materia prima y para cubrir los objetivos particulares.

Por último, se abordará la metodología utilizada para la determinación de humedad, velocidad de secado, color, dureza y consumo de energía.

2.1. Objetivo general

Evaluar la influencia del secado (a vacío y vacío asistido con ultrasonido), mediante el seguimiento de la pérdida de humedad, cambios en color y dureza en cubos de manzana para obtener la velocidad de secado.

2.1.1. Objetivo particular 1

Evaluar el efecto del vacío y la temperatura para el secado de cubos de manzana, mediante la determinación de la pérdida de peso, cambios en color y dureza para obtener la velocidad de secado.

- Variable independiente: Tiempo y temperatura.
- Variable dependiente: humedad, dureza y perfil de color.
- Variable de respuesta: Velocidad de secado.
- Niveles de variación:
 - ✓ Temperatura (40 y 60 °C).
 - ✓ Tiempo (10, 20, 30, 40, 60, 70, 90, 120, 150, 180, 210, 240 y 270 min).
- Vacío: 15 cmHg.

2.1.2. Objetivo particular 2

Determinar el efecto del secado a vacío asistido con ultrasonido y la temperatura en cubos de manzana, mediante el seguimiento de la pérdida de peso, cambios en color y dureza, para obtener velocidad de secado.

- Variable independiente: Tiempo y temperatura.
- Variable dependiente: humedad, dureza y perfil de color.
- Variable de respuesta: Velocidad de secado.
- Niveles de variación:
 - ✓ Temperatura (40 y 60 °C).
 - ✓ Tiempo (10, 20, 30, 40, 60, 70, 90, 120, 150, 180, 210, 240 y 270 min).
- Vacío: 15 cmHg
- Frecuencia del ultrasonido: 40 kHz.

2.2. Diagrama de flujo experimental

En la Figura 8 se presenta el diagrama de flujo experimental de las actividades realizadas para el secado de cubos de manzana.

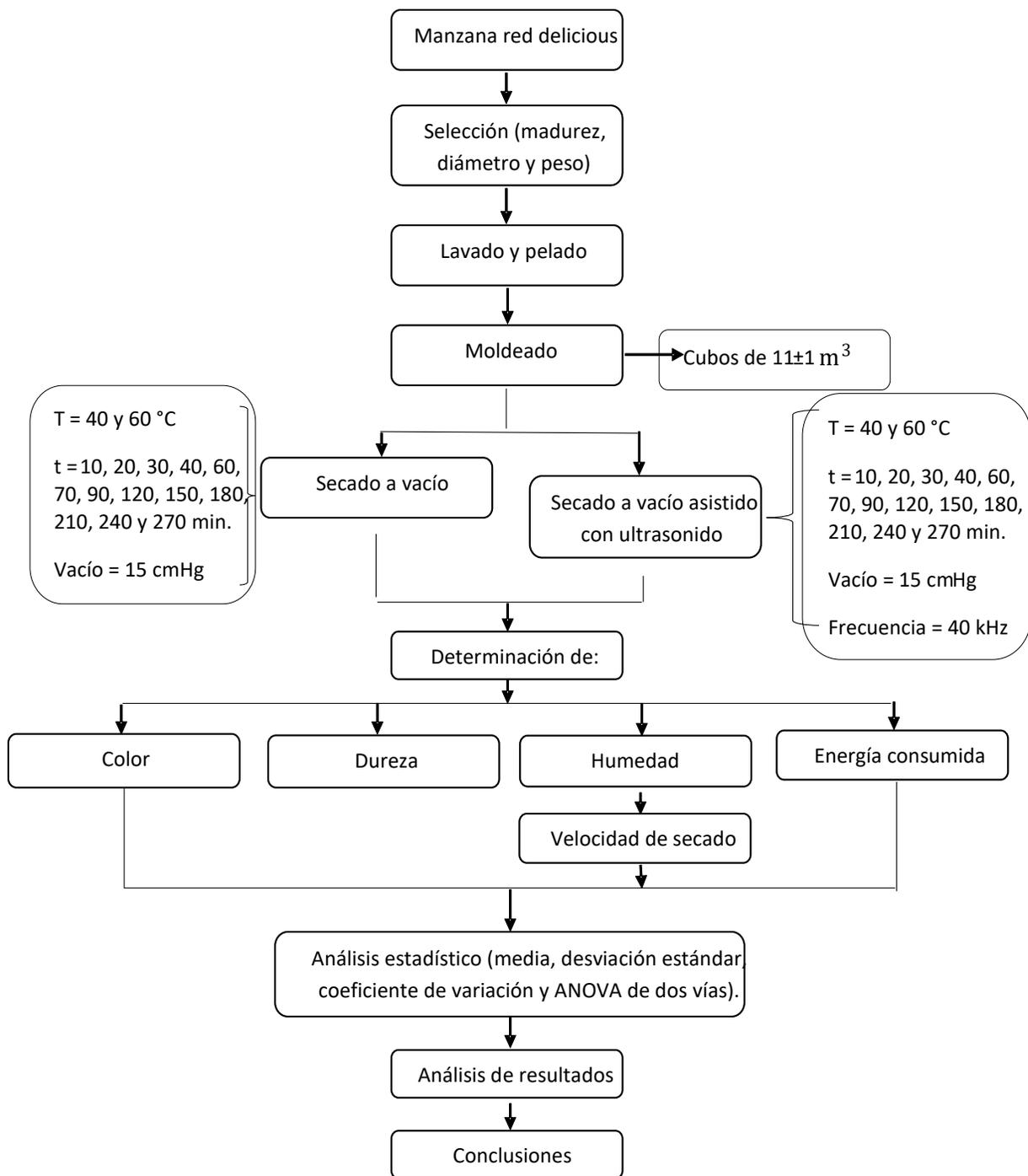


Figura 8. Diagrama de flujo experimental del secado de cubos de manzana.

2.3. Metodología

2.3.1. Caracterización de la materia prima

Esto se realizó con el fin de determinar que la materia prima fuera lo más homogénea posible durante la experimentación. Las manzanas (red delicious) se adquirieron en un mercado local (Tlalnepantla de Baz, Estado de México), fueron seleccionadas en términos de madurez, calibre (diámetro ecuatorial y peso), de acuerdo con el CODEX STAN 299-2010. Se descartaron las manzanas que presentaran daños o lesiones.

La medición del diámetro ecuatorial (mm) se realizó con el vernier, por el diámetro máximo de la sección ecuatorial, donde la diferencia máxima de diámetro entre las manzanas contenidas en un mismo envase no debía superar: 5 mm si el diámetro de las manzanas más pequeñas era inferior a 80 mm, y el diámetro mínimo no debía ser menor a 60 mm.

La medición de la masa (g) se realizó en una balanza analítica Cole-Parmer. En donde la diferencia máxima de peso entre las manzanas contenidas en un mismo envase no debía superar los 20 g si el peso de la manzana más pequeña era igual o superior a 90 g, pero inferior a 135 g. Las pruebas se realizaron en 12 lotes de 14 manzanas cada uno.

2.3.2. Objetivo particular 1

Para cubrir este objetivo se conectó un vacuómetro de Bourdon (capacidad de 76 cmHg) a la línea de vacío, así como al matraz Kitasato, se agregó 1.250 L de agua al baño ultrasónico Cole-Parmer 08895-04 a la temperatura establecida (40 o 60 °C). Después se obtuvieron cubos de manzana de $11 \pm 1 \text{ mm}^3$, se pesaron y colocaron dentro del matraz Kitasato, el cual se encontraba dentro del baño ultrasónico. Posteriormente se abrió la línea de vacío a 15 cmHg para comenzar el secado. Una vez transcurrido el tiempo establecido se cerró la línea de vacío y se pesaron los cubos de manzana. Se realizó la determinación de perfil de color y dureza. Por último, se llevaron a peso constante las muestras en el horno de secado

ECOSHEL 9023A a 100 °C, para determinar la humedad final que tenían las muestras después del tiempo establecido de secado.

Todos los experimentos se realizaron por triplicado, para cada condición establecida. Los resultados se analizaron con la media, desviación estándar y coeficiente de variación. Además de un análisis ANOVA de dos vías para las determinaciones realizadas.

2.3.3. Objetivo particular 2

Para cubrir este objetivo se realizó el mismo procedimiento que en el objetivo particular 1, así como las determinaciones realizadas, solo que en este caso el vacío fue asistido con ultrasonido durante el secado de los cubos de manzana. En el cual se estableció la frecuencia del ultrasonido a 40 kHz en el baño ultrasónico Cole-Parmer 08895-04 como se muestra en la Figura 9. Para la curva de secado se graficó la pérdida de humedad (obtenida como pérdida de peso a cada tiempo de secado) contra el tiempo de secado, la velocidad de secado se determinó como la derivada puntual de la humedad con respecto al tiempo.

Todos los experimentos se realizaron por triplicado, para cada condición establecida. Los resultados se analizaron con la media, desviación estándar y coeficiente de variación. Además de un análisis ANOVA de dos vías para las determinaciones realizadas.

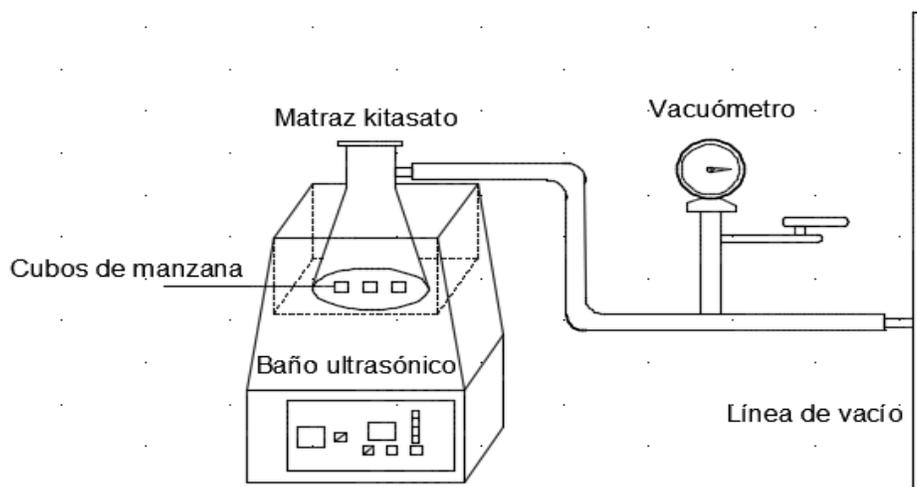


Figura 9. Montaje experimental del secado de cubos de manzana.

2.3.4. Determinación de humedad

La determinación de humedad se realizó con el fin de conocer el porcentaje de humedad que contienen las manzanas antes y después del secado. Se realizó en un horno de secado ECOSHEL 9023A a 100 ± 1 °C siguiendo la NMX-F-083-1986.

Se llevó a peso constante las charolas de aluminio, se pesaron 5 g de manzana en cada charola (3 charolas) y se colocaron en el horno de secado. Se dejó secar la muestra por 2 horas, se sacaron las muestras y se dejaron enfriar por 20 minutos en el desecador. Después se pesaron y se volvieron a meter al horno de secado.

Cada 30 minutos se sacaron, enfriaron y pesaron las muestras hasta peso constante. Se determinó el porcentaje de humedad con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{P - P1}{P2} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

P = Peso de la charola de aluminio con la muestra húmeda (g).

P1 = Peso de la charola de aluminio con la muestra seca (g).

P2 = Peso de la muestra (g).

Se realizó la conversión de los datos a g de agua / g de sólido seco de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad} = \frac{W - Ws \text{ (g agua)}}{Ws \text{ (g sólido seco)}} \quad (5)$$

Donde:

W = Peso del sólido húmedo (g).

Ws = Peso del sólido seco (g).

Se realizaron 3 repeticiones para cada condición establecida. Se realizó un análisis estadístico para el cual se utilizó la media, desviación estándar, coeficiente de variación y un ANOVA de dos vías.

2.3.5. Determinación de velocidad de secado

La velocidad de secado se determinó como la derivada puntual de la humedad con respecto al tiempo, el cual se obtuvo a cada tiempo de proceso de acuerdo con la siguiente ecuación (Xue, 2004):

$$V_s = -\frac{dH}{dt} \quad (2)$$

Donde:

V_s = Velocidad de secado.

dH / dt = Diferencia del contenido de humedad con respecto al tiempo.

2.3.6. Determinación de color interno

La determinación de color interno se realizó con base al sistema CIELAB en cubos de manzana de $11 \pm 1 \text{ mm}^3$, con el colorímetro Konica Minolta CR-400, observador estándar de 10° , apertura de 8 mm, empleando el iluminante C.

Se realizó la calibración del colorímetro, la medida se tomó colocando una celda de cuarzo sobre el cubo de manzana (el colorímetro tenía que quedar exactamente a la mitad del cubo). Se obtuvieron valores de L^* , a^* y b^* los cuales sirvieron para determinar la diferencia total de color (ΔE^*) con base a la siguiente ecuación:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2} \quad (3)$$

Donde:

Δa^* = Coordenadas rojo/verde (+ = indica rojo, - = indica verde)

Δb^* = Coordenadas amarillo/azul (+ = indica amarillo, - = indica azul)

ΔL^* = luminosidad (+ = indica blanco, - = indica negro)

Se realizaron 3 repeticiones para cada condición establecida. Se realizó un análisis estadístico para el cual se utilizó la media, desviación estándar, coeficiente de variación y un ANOVA de dos vías.

2.3.7. Determinación de dureza

Para la determinación de dureza se realizó una prueba de penetración por compresión simple con un Texturómetro Brookfield CT3 en cubos de manzana de $11 \pm 1 \text{ mm}^3$, empleando la sonda TA2 15/1000, cono de 45° , a una velocidad de 0.5 mm/s, a una profundidad de 50% del espesor y una carga de activación de 125 gf. La dureza se determinó a partir de los perfiles fuerza-deformación como la fuerza máxima lograda.

Se realizaron 3 repeticiones para cada condición establecida. Se realizó un análisis estadístico para el cual se utilizó la media, desviación estándar, coeficiente de variación y un ANOVA de dos vías.

2.3.8. Energía consumida

La energía consumida se determinó con base a la potencia de los equipos empleados y el tiempo de proceso, la ecuación utilizada es la siguiente:

$$\text{Energía consumida} = (\text{Potencia})(\text{Tiempo}) \quad (6)$$

Donde:

La potencia está dada en kilowatts (kW), el tiempo en horas (h) y por lo tanto la energía consumida en kW*h.

El tiempo utilizado fue el establecido a 4 horas de secado. Para el caso del vacío se sumó la energía utilizada para calentar el agua a las temperaturas establecidas en la parrilla eléctrica Cole-Parmer, el cual se utilizó durante todo el proceso (4 horas). Para el VUS se consideró tanto la energía utilizada del baño ultrasónico, así como la del vacío y también la energía utilizada de la parrilla eléctrica durante 20 minutos el cual fue el tiempo que se requirió para que el agua alcanzara la temperatura establecida, ya que la aplicación del ultrasonido permitió mantener las temperaturas del proceso. También se determinó la energía requerida en el horno de secado ECOSHEL 9023A al mismo tiempo de proceso.

Capítulo 3: Resultados y análisis

En este capítulo se darán a conocer los resultados obtenidos durante el secado a vacío y VUS en cubos de manzana.

Inicialmente se presentan las curvas de secado, las cuales se graficaron como la pérdida de humedad en función del tiempo, en donde se obtuvieron cuatro gráficas. La primera es una comparación de ambas metodologías a 40 °C, la segunda a 60 °C, la tercera es una comparación de las anteriores y la cuarta es el análisis estadístico realizado.

Después se pasará a la velocidad de secado, el cual se evaluó sobre la base de las curvas de secado y los cambios de temperatura del material obtenidos durante el proceso, como la derivada puntual de la humedad con respecto al tiempo. Los valores promedio obtenidos se muestran en 3 gráficas.

Una vez concluido lo anterior se abordará el perfil de color, el cual se presenta como el cambio de color total (ΔE^*), se muestran los valores promedio obtenidos, así como el análisis estadístico.

También se presentará la dureza de la manzana. Partiendo desde la dureza de la muestra fresca, seguido de una representación de los cambios que ocurren con VUS a 60 °C, después se muestran las gráficas comparativas a 40 y 60 °C para ambas metodologías y finalmente se presentara el análisis estadístico realizado.

Por último, se mostrarán los valores obtenidos de consumo de energía con las metodologías utilizadas durante el secado de manzana.

3.1. Curvas de secado.

Comparando las técnicas de secado a vacío y vacío asistido con ultrasonido (VUS) a temperaturas de 40 y 60 °C, las curvas de secado se presentan como la pérdida de humedad en función del tiempo como se muestran en las Figuras 10, 11 y 12. El primer proceso de secado fue a vacío, el cual se evaluó a 40 °C y se comparó con VUS a la misma temperatura como se muestra en la Figura 10.

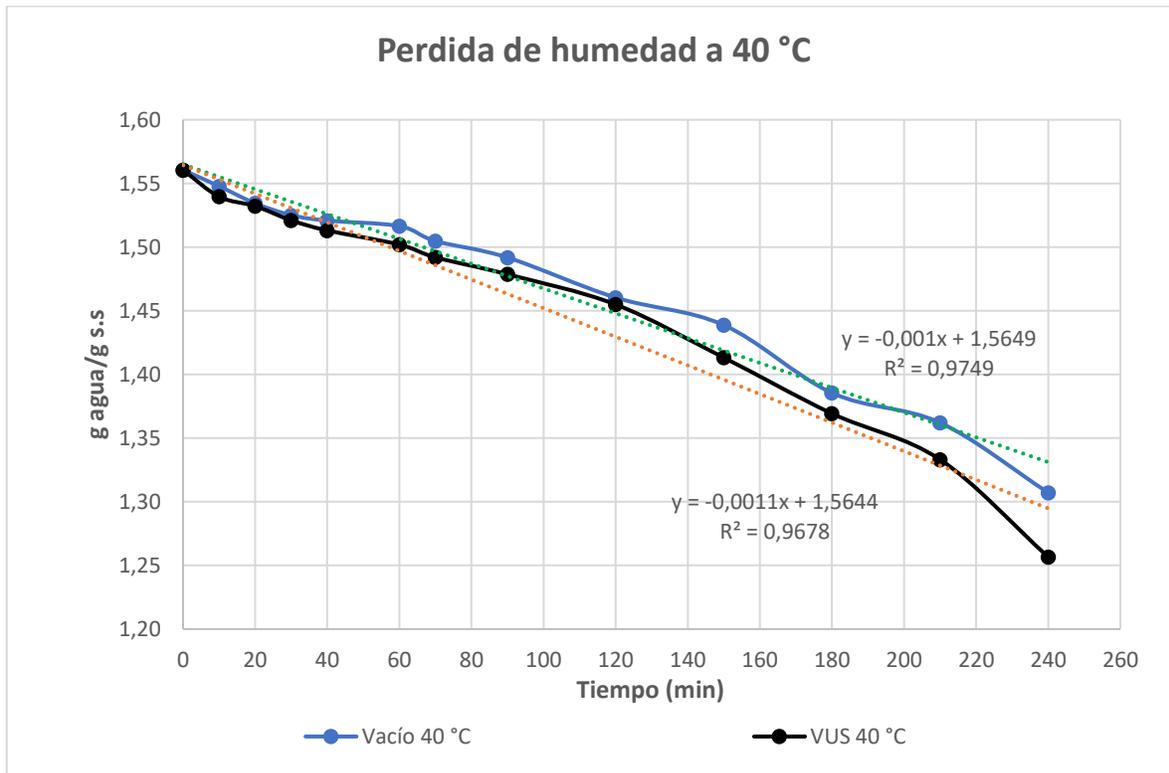


Figura 10. Curva de secado a vacío y vacío asistido con ultrasonido a 40 °C.

En la Figura 10 se observa que el contenido de humedad disminuyó continuamente con respecto al tiempo para ambos métodos de secado aplicados, la humedad retirada fue poca debido al nivel bajo de vacío utilizado (15 cmHg) y una temperatura baja (40 °C), obteniendo valores de 1.3071 g agua/g s.s de humedad final para vacío y 1.2556 g agua/g s.s para VUS. También se observa que durante los primeros 40 min de secado la pérdida de humedad fue muy similar tanto para el secado a vacío, como para VUS, donde la diferencia para ambos casos fue de 0.0078 g agua/g s.s. Mientras que después de los 40 min se comenzó a notar que, conforme transcurría el tiempo hubo mayor pérdida de humedad en el secado a VUS en comparación con

el vacío, sin embargo, fue hasta después de las 4 horas de secado donde se notó que hubo una mayor diferencia, donde se perdió 0.0505 g agua/g s.s de humedad más que con el secado a vacío.

En la Figura 11 se presentan las curvas comparativas de secado a vacío y a VUS a 60 °C.

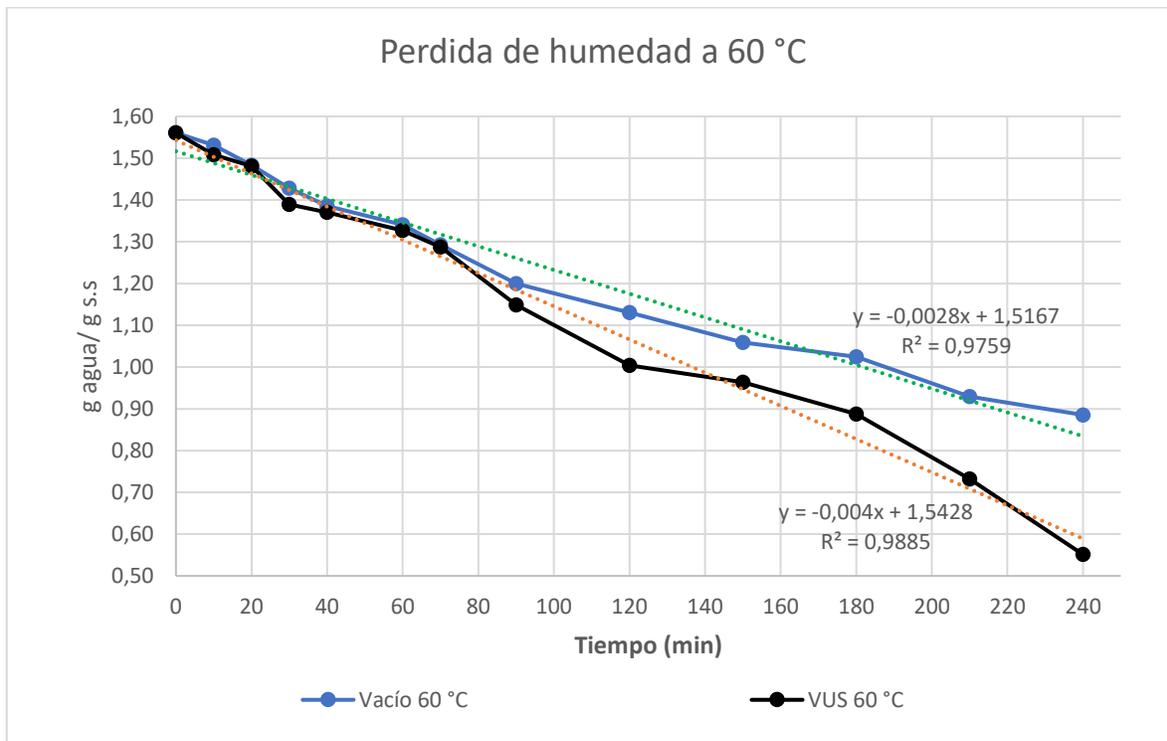


Figura 11. Curva de secado a vacío y vacío asistido con ultrasonido a 60 °C.

En la Figura anterior se observa que durante los primeros 20 minutos de secado la pérdida de humedad para los dos tratamientos fue muy similar con una diferencia de 0.0019 g agua/g s.s. Mientras que a los 30 minutos se observó una mayor diferencia de 0.0388 g agua/g s.s. Sin embargo después de los 40 minutos la diferencia se redujo en un 0.0150 g agua/g s.s, y conforme transcurría el tiempo de secado se empezó a notar el efecto del ultrasonido, ya que con VUS se tuvo una mayor pérdida de humedad en comparación con solo vacío, donde la diferencia final fue de 0.3342 g agua/g s.s.

En este caso para ambos métodos la humedad que se retiró fue mayor en comparación con la temperatura de 40 °C obteniendo humedades finales de 0.8855 agua/g s.s para vacío y 0.5513 g agua/g s.s para VUS.

En la Figura 12 se muestra la gráfica comparativa de las dos técnicas y temperaturas de secado empleadas en la experimentación en cubos de manzana.

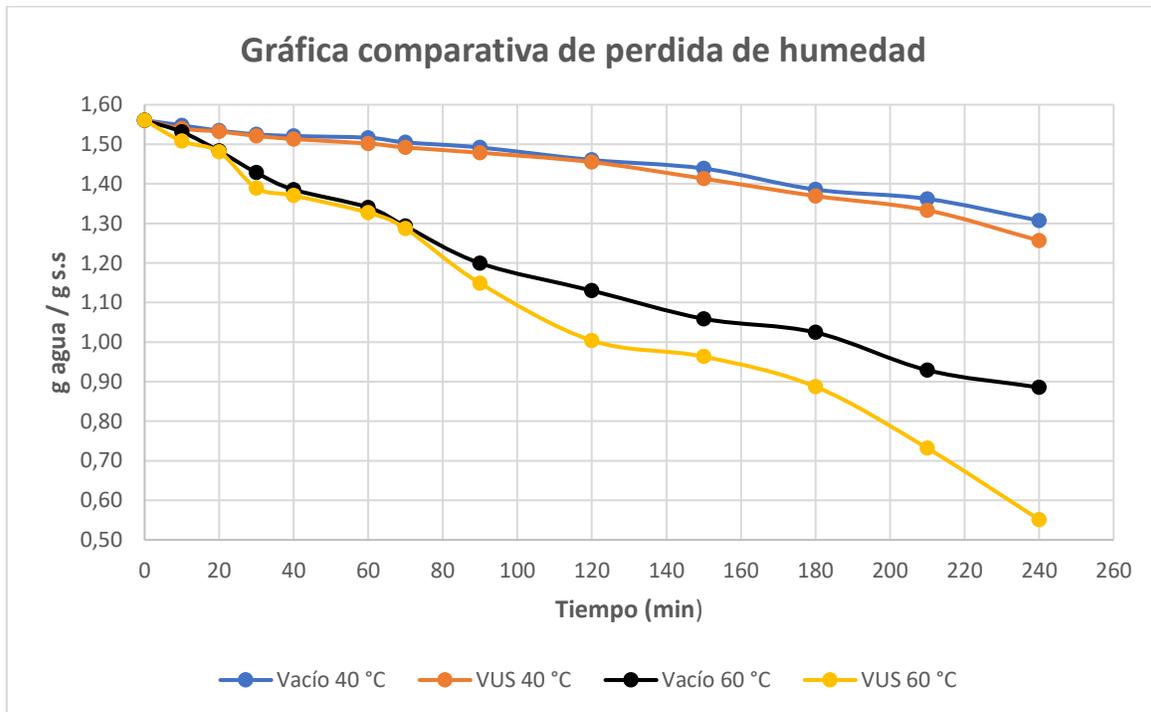


Figura 12. Curva de secado a vacío y vacío asistido con ultrasonido a 40 y 60 °C.

En la Figura anterior se observa que el efecto más importante fue la temperatura, ya que se perdió más humedad cuando se trabajó a 60 °C. En el secado a vacío a una temperatura de 60 °C se perdió un 27% de humedad adicional en comparación con la de 40 °C. Mientras que a VUS ocurre algo similar ya que a una temperatura de 60 °C se perdió un 45% más de humedad comparada con la de 40 °C.

También se aprecia que en los dos casos de secado el ultrasonido potencializa aún más la pérdida de agua conforme transcurre el tiempo.

Estudios anteriores corroboran que el VUS disminuye el tiempo de procesamiento. Tekin *et al.* (2017) informan una mayor tasa de secado en ejotes en comparación

con solo secado a vacío a las mismas condiciones de procesamiento. Además, cuando se probó con filetes de carne de res y pollo, salmón y trucha, también se obtuvieron resultados positivos, en los que VUS produjo una mayor velocidad de secado en comparación con solo a vacío y en horno (Baslar *et al.*, 2014; Baslar, Klichí, & Yalinkilic, 2015).

Chen, Guo & Wu (2016) informaron un período de proceso más corto para las zanahorias con el uso de ultrasonido y vacío cuando se deshidrataron a 65 °C, que fue aproximadamente 1.8 veces más rápido que la técnica de solo a vacío. Mientras que Viera *et al.* (2018) reportaron resultados similares en el procesamiento de papaya a 60 °C, el secado a VUS presentó el tiempo más corto de tratamiento comparado con el secado a vacío y por ultrasonido. Rodríguez *et al.* (2014) informaron que la deshidratación de manzana a 70 °C con aplicación de ultrasonido el tiempo de proceso se redujo en un 17%.

También se aprecia que en ambos casos el ultrasonido no tuvo gran efecto en los primeros minutos de secado, esto concuerda con los estudios realizados por Beck *et al.* (2014) en donde mencionan que el ultrasonido parece no acelerar, o solo marginalmente, la eliminación de agua en la primera parte del tratamiento, es decir, en una etapa en la que hay agua superficial libre. También hay un cierto retraso de tiempo después del cual el ultrasonido acelera la pérdida de humedad de manera significativa, una vez que el agua superficial libre se ha evaporado. Posteriormente, el agua debe difundirse a la superficie de la muestra con una mayor resistencia interna.

El ultrasonido parece afectar significativamente este proceso de difusión interna. Esto es porque las ondas de presión tienen varios efectos en el proceso de transporte de humedad, como la cavitación, lo que significa que pequeñas burbujas de vapor implosionan debido a la rápida expansión y contracción, durante las cuales ocurre un aumento breve y localizado de la temperatura y presión (Leighton, 1998).

El efecto de calentamiento puede aumentar la tasa de evaporación de humedad, reducir la capa límite de difusión, aumentar la transferencia de masa y acelerar la difusión. El efecto esponja (series rápidas de ciclos de expansión y compresión

alternados) produce la liberación de líquido desde la parte interna de la partícula a la superficie sólida, y las fuerzas involucradas en este mecanismo pueden ser más altas que la tensión superficial que mantiene las moléculas de agua dentro de los capilares del material, creando canales microscópicos y facilitando los intercambios de materia, retirando la humedad fuertemente adherida (Fan & Zhang, 2017; Yao, 2016). Lo que provoca que a medida que transcurre el tiempo de secado la aplicación del ultrasonido reduzca el tiempo de proceso.

En la Figura 13 se presenta el análisis estadístico realizado en la pérdida de humedad de los cubos de manzana, el cual fue un ANOVA de dos vías.

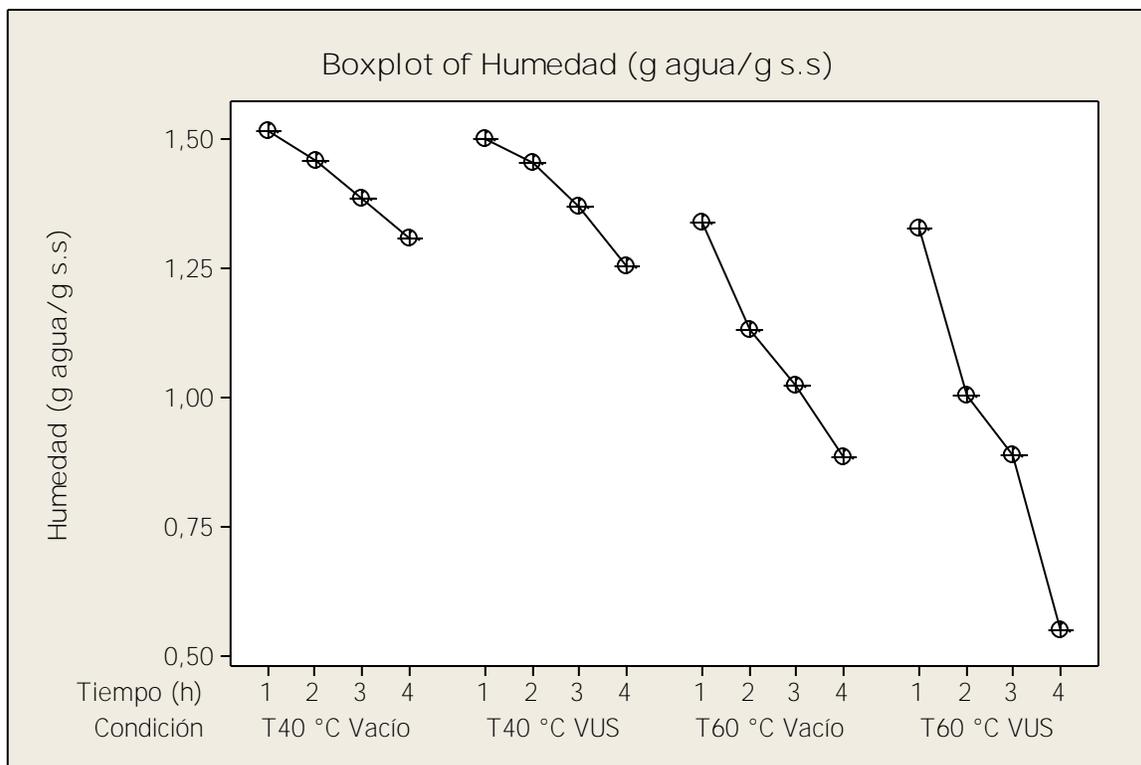


Figura 13. Pérdida de humedad en cubos de manzana.

En Figura 13 se observa que la menor remoción de humedad se da cuando se trabaja con secado a vacío a 40 °C. Esto se debe a que con una temperatura baja la remoción de humedad de las muestras es más lenta, además de que el vacío aplicado fue bajo (15 cmHg), lo que propicio que la transferencia de masa no ocurriera de forma rápida.

También la estructura del alimento juega un papel importante, Villamiel *et al.* (2017) informaron que, en el secado por convección, el tejido vegetal continúa presentando células turgentes con una pared celular definida y organizada, lo que dificulta la difusividad del agua durante el proceso de secado.

También se observa que la mayor pérdida de humedad se dio cuando se aplicó vacío asistido con ultrasonido a 60 °C. Esto puede explicarse ya que a temperaturas altas de procesamiento existe una mayor transferencia de calor y masa lo que hace que la evaporación de humedad en el producto se realice en mayor cantidad.

Además, al aplicar ultrasonido probablemente debido a la mayor velocidad de la vaporización del agua cuando se aplica esta metodología, y mientras existe suficiente cantidad de agua en el tejido, la evaporación de agua en la parte interna de la muestra supone la creación de un gradiente de presión de vapor, que actúa como fuerza impulsora adicional para la difusión de agua. Como consecuencia, la aplicación de esta tecnología disminuye el tiempo de secado (Valencia & Rodríguez, 2011). Por lo que, si se quiere reducir el tiempo de secado se debe trabajar con vacío asistido con ultrasonido a 60 °C.

3.2. Velocidad de secado.

La velocidad de secado se evaluó sobre la base de las curvas de secado y los cambios de temperatura del material obtenidos durante el proceso, el cual se determinó como la derivada puntual de la humedad con respecto al tiempo (donde el significado físico de la pendiente es la velocidad de secado). Se obtuvieron valores de la pendiente a cada tiempo de proceso los cuales se muestran en las Figuras 14, 15 y 16.

Natharanakule, Kraiwanichkul & Soponronnarit (2007) dividieron el período de secado en tres etapas, periodo de inducción (creciente), periodo de velocidad constante y periodo de velocidad decreciente e informaron que la tasa de secado fue menor en la segunda y tercera etapa en comparación con la primera etapa. Esto se debe a que, la humedad de la superficie se evapora rápidamente en la etapa inicial del proceso debido a la mayor transferencia de calor y masa (Toujani *et al.*, 2013).

En este caso ocurrió algo similar ya que se obtuvo una mayor velocidad durante los primeros minutos para ambas metodologías empleadas tanto a 40 como a 60 °C, solo en el caso de VUS a 40 °C la mayor velocidad se dio al final del proceso como se observa en la Figura 14.

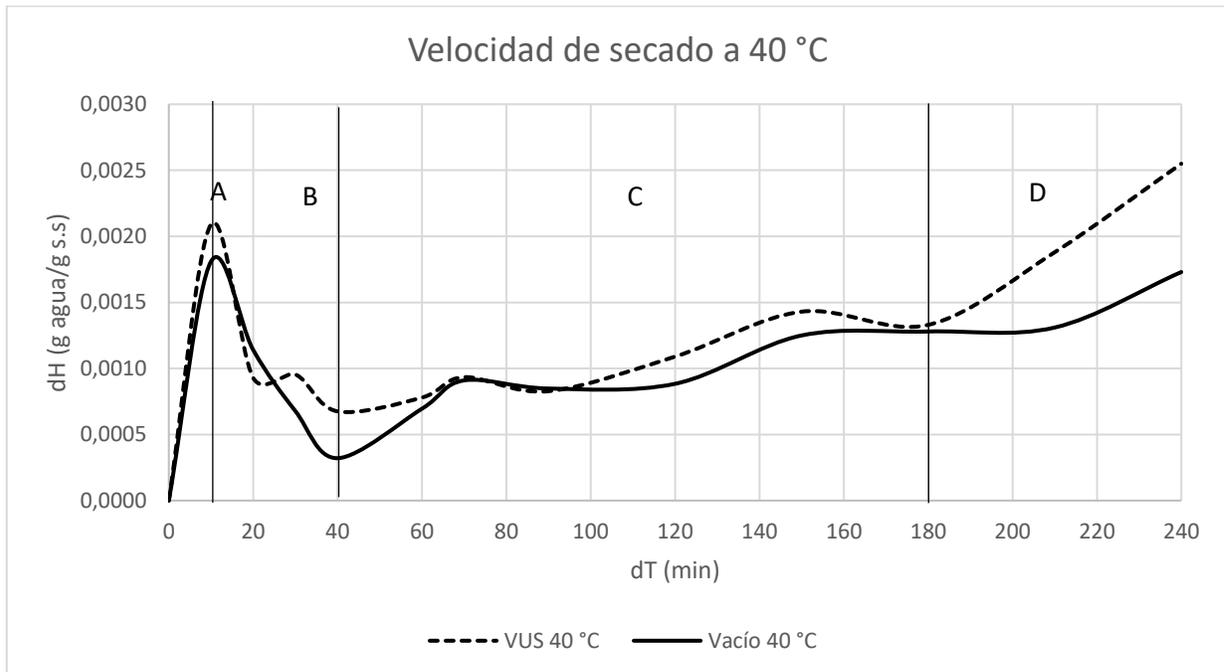


Figura 14. Velocidad de secado a 40 °C a vacío y VUS.

En la Figura 14 se observa que la velocidad de secado tanto para vacío y VUS a 40 °C aumentó en los primeros 10 minutos de proceso (zona A). Después de este tiempo se notó el periodo de velocidad decreciente hasta los 40 minutos (zona B), observando que, para vacío se tuvo la velocidad más baja en comparación con VUS. Después de los 40 minutos se obtuvo el periodo de velocidad constante (zona C) hasta los 180 minutos (con valores promedio de 0.0009 ± 0.0003 g agua/g s.s*min para vacío y 0.0010 ± 0.0002 g agua/g s.s*min para VUS), finalmente después de este tiempo se observó otro periodo de velocidad creciente (zona D), en donde la mayor velocidad fue con VUS.

En la Figura 15 se muestra la gráfica comparativa de la velocidad de secado a 60 °C a vacío y VUS. Se observa que la mayor velocidad se dio durante los primeros 20 minutos de secado para ambas metodologías empleadas (zona A). En este caso tanto para vacío como VUS se observaron dos periodos de velocidad decrecientes,

Jose Luis Miguel Olivares 2019

el primero entre 20 y 40 minutos, el segundo entre 70 y 140 minutos (zonas B y D respectivamente). El periodo constante para vacío se tuvo en las zonas C y E, mientras que para VUS en la zona E se observó un aumento y posteriormente una zona constante.

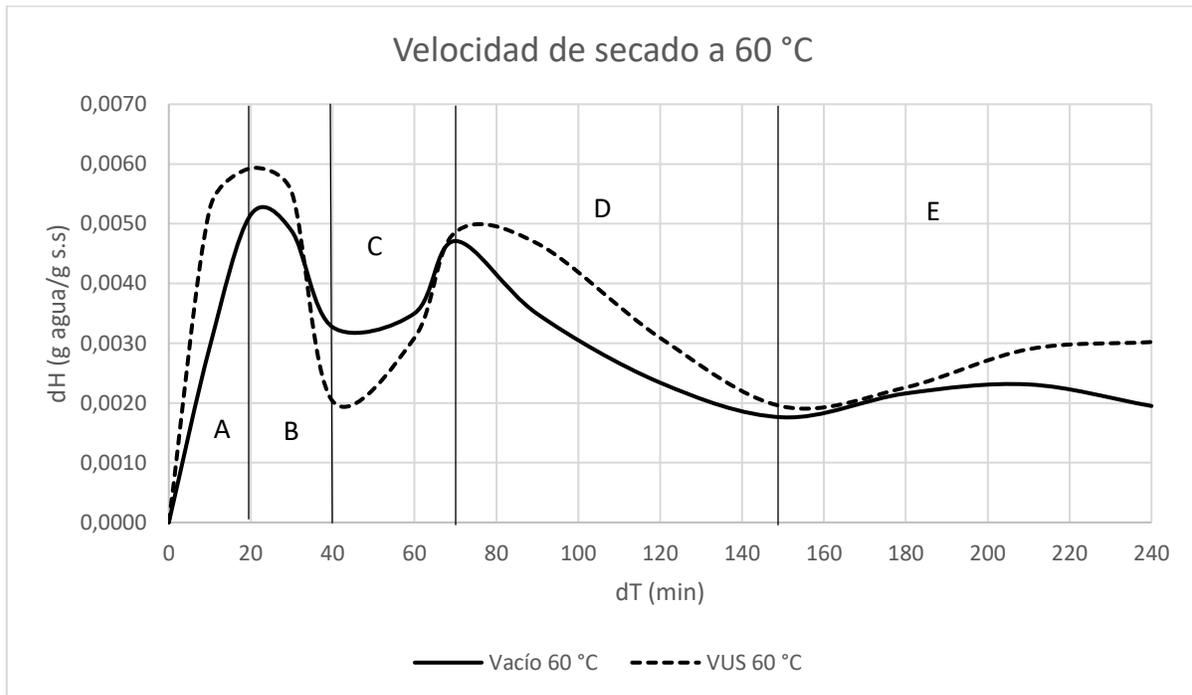


Figura 15. Velocidad de secado a 60 °C a vacío y VUS.

Tanto a 40 como a 60 °C con ambas metodologías utilizadas se observaron los tres periodos de velocidad de secado durante el proceso. El incremento en la velocidad al inicio de la operación fue porque la evaporación del agua ocurre principalmente en la superficie del material, el cual es más fácil de retirar porque no existe interacción con otros compuestos del alimento y se encuentra más disponible a difundirse al medio lo que resulta en una mayor tasa de secado.

A medida que el proceso de secado continúa, la velocidad de secado disminuye ya que, la migración de la humedad no es suficiente para mantener la superficie en una condición saturada, ya que es más difícil el transporte del agua desde el interior de la manzana, lo que conduce a un periodo de velocidad decreciente. Por lo tanto, la difusión interna es el mecanismo físico más probable para la transferencia de agua en el material (Zhao, 2018). Mientras tanto cuando la superficie del alimento se

satura por la migración de la humedad desde el interior, la velocidad vuelve a aumentar y disminuye cuando esta se evapora, lo anterior ocurre porque las membranas celulares se rompen en diferentes etapas de secado en lugar de colapsar de una sola vez, con lo cual se libera el agua intracelular, la cual se va difundiendo al exterior conforme se va liberando durante el proceso. El colapso de la membrana depende principalmente de la tasa de penetración de la energía térmica.

En la Figura 16 se muestra la gráfica comparativa de la velocidad de secado a 40 y 60 °C a vacío y VUS.

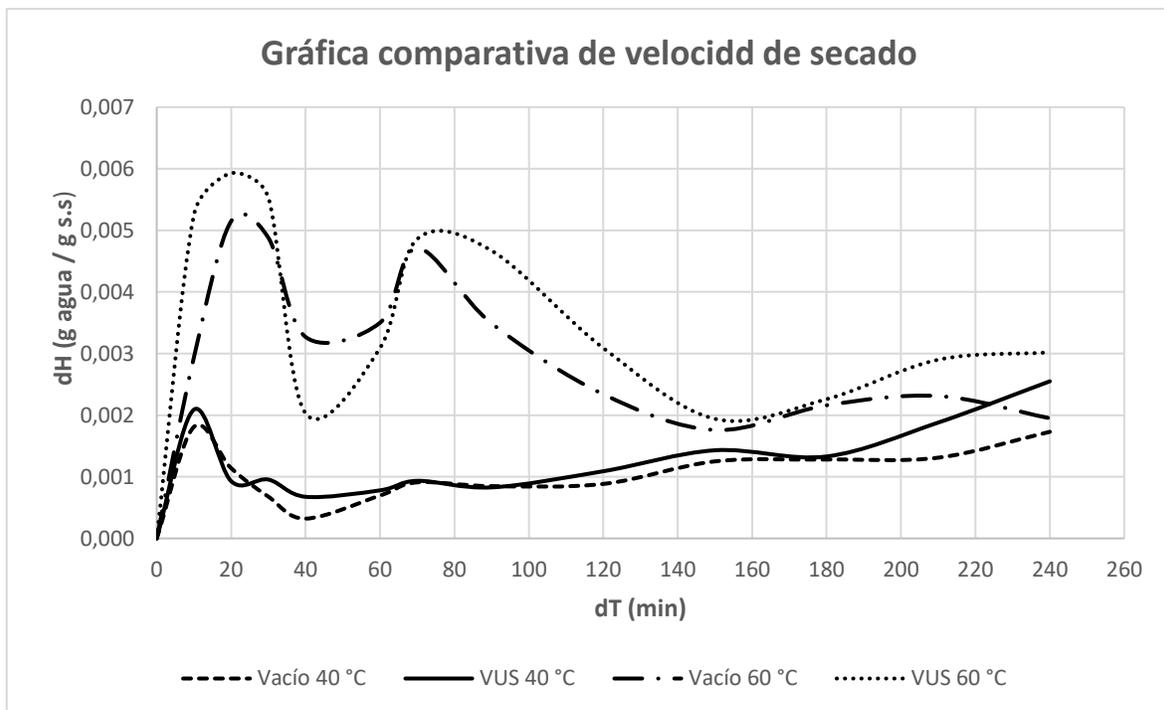


Figura 16. Velocidad de secado a 40 y 60 °C a vacío y VUS.

Como se muestra en la Figura 16 la pendiente de las curvas cambio durante el secado, lo que indica que las tasas de secado cambiaron durante el proceso.

Se observa que la aplicación de ultrasonido durante el secado de la manzana aumentó la velocidad a ambas temperaturas probadas.

La aplicación de ultrasonido interrumpe la continuidad de las membranas y, por lo tanto, aumenta la velocidad de transferencia de masa entre la célula y su entorno

extracelular (Baslar *et al.*, 2014). Se supone que las vibraciones mecánicas, la creación de microcanales en la matriz de los alimentos o la imposibilidad de colapsar estos canales al secarse, son los responsables de la eliminación más rápida del agua. En las muestras de alimentos, debido a su origen natural, el secado también se ve influenciado por las fluctuaciones en la estructura del tejido, que varía entre los diferentes tratamientos (Beck *et al.*, 2014). Sin embargo, también se observaron dos casos en donde la velocidad con VUS fue menor en comparación con solo vacío, los cuales fueron a 20 y 90 min a 40 °C, mientras que a 60 °C fueron a 40 y 60 min de proceso. Esto puede ser debido a que, antes de estos tiempos se tuvo mayor remoción de humedad con VUS en comparación con solo vacío, lo cual propicio que disminuyera la velocidad, ya que se comenzaba a retirar la humedad contenida en el interior del alimento, también se le puede atribuir a la formación de una costra en la superficie del alimento y al encogimiento de la estructura lo que dio como resultado que se tuviera menor velocidad en comparación con vacío. Cabe mencionar que el grado de madurez de la manzana también pudo influir, ya que, aunque se trató de emplear un lote homogéneo no se pudo garantizar que las manzanas tuvieran siempre las mismas características.

También se observó que a una temperatura de 60 °C la velocidad fue mayor que a 40 °C, esto coincidió con estudios realizados por Baslar *et al.* (2014), Giri & Prasad (2007) y Laopoolkit & Suwannaporn (2011). Esto puede explicarse por el hecho de que las temperaturas de secado más altas causan una mayor transferencia de calor y masa (Toujani *et al.*, 2013).

Al aplicar ultrasonido en combinación con una temperatura elevada (60 °C) se observó la mayor velocidad de secado, esto sucedió porque el agua se eliminó fácilmente debido al daño estructural inducido por estos tratamientos. El alto grado de daño en las paredes celulares facilitaron la liberación del agua desde la matriz hacia el exterior debido al aumento de los espacios intracelulares, los canales intercelulares y la formación de nuevas vías a través de la estructura, lo que facilitó el movimiento de la humedad entre las células hacia el exterior.

3.3. Perfil de color

El color es un parámetro de calidad muy importante para el consumidor. Los resultados se presentan como el cambio de color total ΔE^* entre los cubos de manzana frescos y secos, los cuales se presentan en la Tabla 3.

En la Tabla 3 se aprecia que conforme transcurre el tiempo de tratamiento la diferencia total de color aumenta en todos los casos. Se observa que los cambios más importantes ocurrieron en la primera hora de secado. Fernández & Pricila (2007), reportaron algo similar en un estudio de secado de manzana, relacionado con el pardeamiento enzimático de discos de manzana Granny Smith de 22 mm de diámetro y 10 mm de espesor, donde los mayores cambios en la variación de color se dieron durante las primeras horas del proceso. La diferencia de color total reportada fue de 46.2314, mientras que cuando se empleó un pretratamiento el valor de (ΔE^*) fue de 21.39 ± 0.50 .

Tabla 3. Valores promedio de la diferencia total de color (ΔE^*).

Tiempo (h)	Vacío 40 °C	VUS 40 °C	Vacío 60 °C	VUS 60 °C
1	10.33 ± 5.34	7.96 ± 1.26	15.04 ± 0.84	14.39 ± 0.66
2	10.53 ± 0.05	9.97 ± 1.33	30.93 ± 0.95	25.12 ± 0.67
3	12.37 ± 1.39	11.90 ± 2.89	37.22 ± 1.07	31.57 ± 2.03
4	15.86 ± 0.60	13.91 ± 2.35	44.56 ± 0.81	34.63 ± 1.56

El secado a vacío como prueba de referencia muestra el mayor cambio de color total, $\Delta E^* = 15.86 \pm 0.60, 44.56 \pm 0.81$ a 40 y 60 °C respectivamente. Mientras que a VUS los valores de ΔE^* a 40 y 60 °C fueron de 13.91 ± 2.35 y 34.63 ± 1.56 . Sin embargo, los valores obtenidos siguen siendo elevados, ya que por encima de $\Delta E^* = 5$ el observador tiene una impresión de dos colores diferentes. En este caso, el aumento del color rojo (a^*) y la disminución del color amarillo (b^*) provocaron un oscurecimiento de las muestras durante el procesamiento y, por lo tanto, una reducción de los valores del parámetro L^* . Todos estos efectos dieron como resultado el aumento de ΔE^* .

En la Figura 17 se aprecia el análisis estadístico realizado de la diferencia total de color en el secado de cubos de manzana.

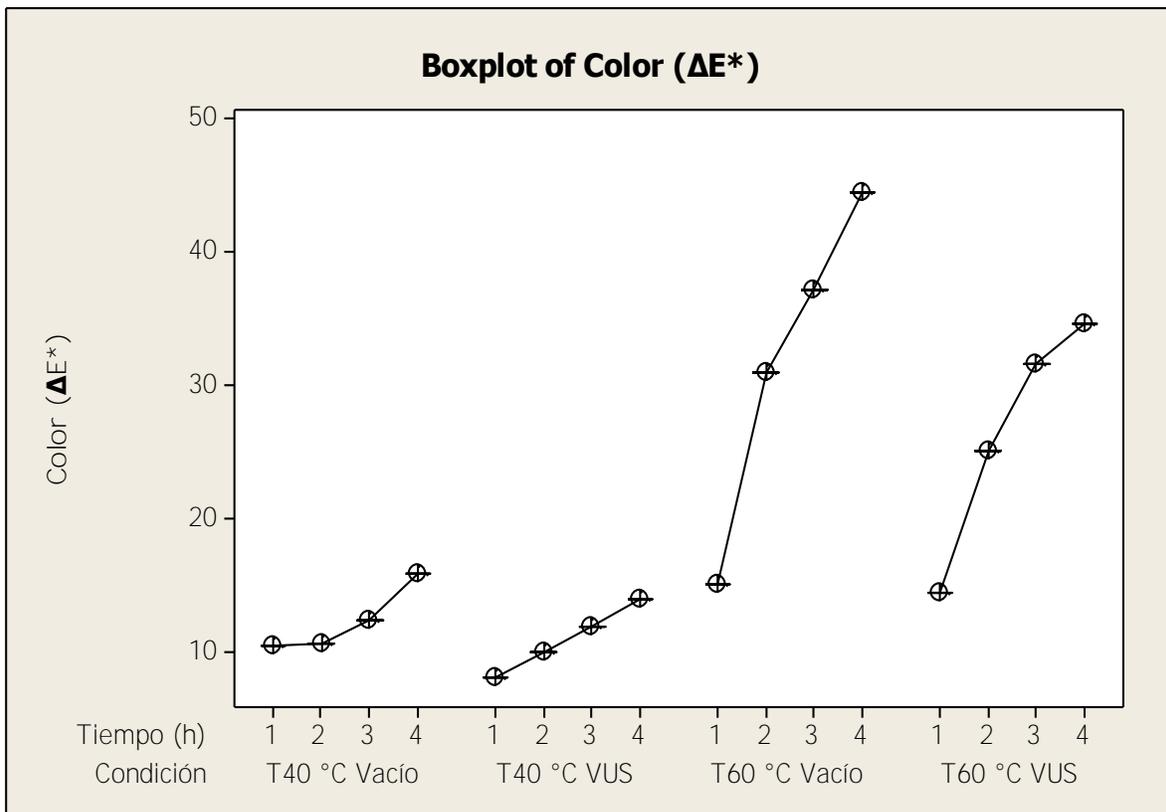


Figura 17. Diferencia total de color (ΔE^*).

En la Figura 17 se observa que la temperatura fue el factor más importante en los cambios de color, ya que, a una temperatura de 40 °C se tuvo menor pérdida de color en comparación con la de 60 °C, tanto para el secado a vacío como a VUS. Por lo que los efectos más significativos se dieron cuando se trabajó a 60 °C, además en el secado solo a vacío a esta temperatura tuvo la mayor pérdida de color, comparada con el vacío asistido con ultrasonido. Esto se debe a que al aplicar ultrasonido se minimiza la acción de las enzimas que causan el deterioro del color y por lo tanto se tienen una mayor preservación del color. La pérdida de color de las manzanas se le atribuye principalmente por la actividad de la enzima polifenoloxidasasa ya que la manzana contiene muy poca cantidad de proteínas para que pudieran propiciar el oscurecimiento no enzimático. Esta enzima requiere la presencia de oxígeno para llevar a cabo sus funciones, debido al bajo nivel de vacío empleado (15 cmHg) durante el secado, la enzima sigue actuando ya que dentro

del sistema se encuentra una baja cantidad de oxígeno que propicia la reacción y por lo tanto el pardeamiento enzimático.

De acuerdo con Salazar (2013) al ocurrir la ruptura de las células la enzima se pone en contacto con los sustratos fenólicos y en presencia de oxígeno inicia la reacción que conduce a la formación de quinonas, las que reaccionan entre si con otros compuestos formando melaninas, que son complejos macromoleculares de color oscuro. La velocidad y grado de pardeamiento depende también de la variedad (ya que diversas variedades contienen diferentes concentraciones y/o actividad de PPO o concentración de compuestos fenólicos), estado de madurez, presencia de oxígeno y comportamiento de las enzimas y sustratos (Galindo, 2011).

3.4. Dureza

Los resultados obtenidos para la muestra fresca se presentan en la Figura 18.

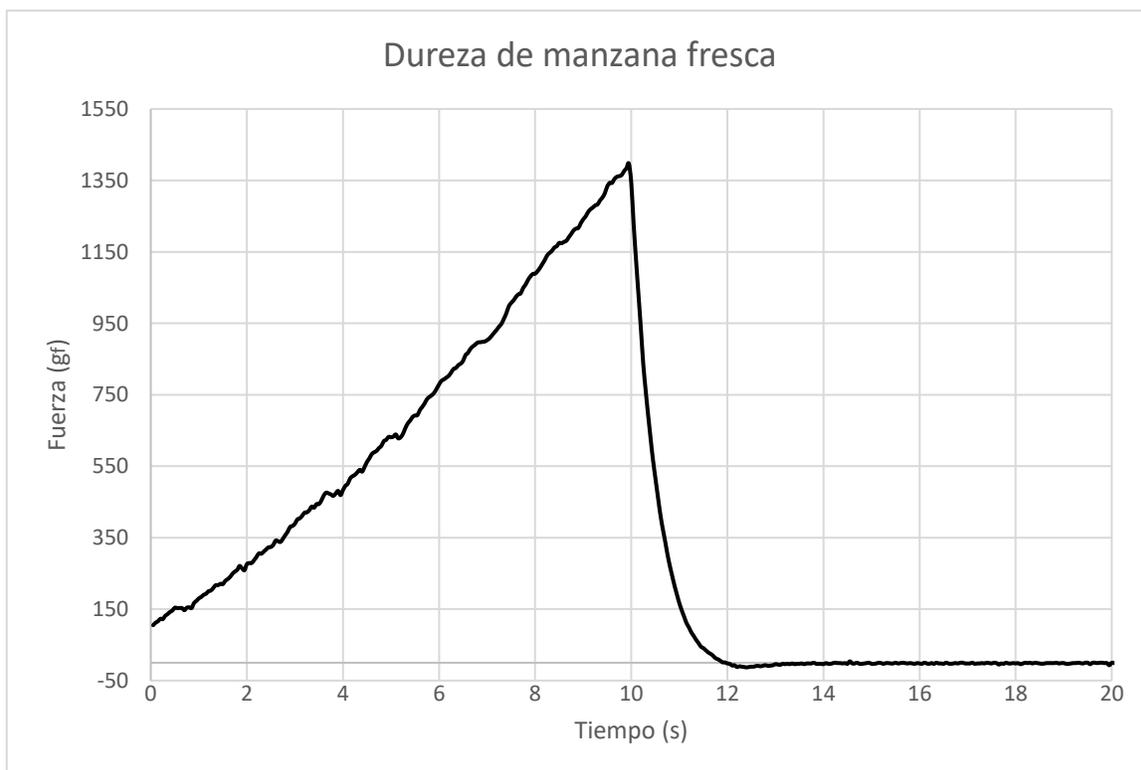


Figura 18. Dureza de cubos de manzana frescos.

La dureza tanto de la manzana fresca como de la seca a diferentes condiciones de procesamiento se determinó mediante pruebas de compresión, como la fuerza máxima lograda durante el primer ciclo de compresión.

En la Figura 18 se puede observar pequeños picos que representan fracturas antes de obtener la fuerza máxima que representa la dureza de la manzana fresca, la cual se obtuvo casi a los 10 segundos durante la compresión con un valor promedio de 1397 gf. De acuerdo con la investigación de Royer *et al.* (2003), la dureza de la manzana varía entre 1150 y 1600 gf. Pero cabe decir que este parámetro es muy variable y es directamente proporcional al estado de madurez.

En la Figura 19 se hace una representación de los cambios en la dureza que se tienen cuando un alimento es sometido a secado, en este caso se seleccionó la temperatura de 60 °C a VUS que fue con el que se tuvieron mayores cambios en esta propiedad.

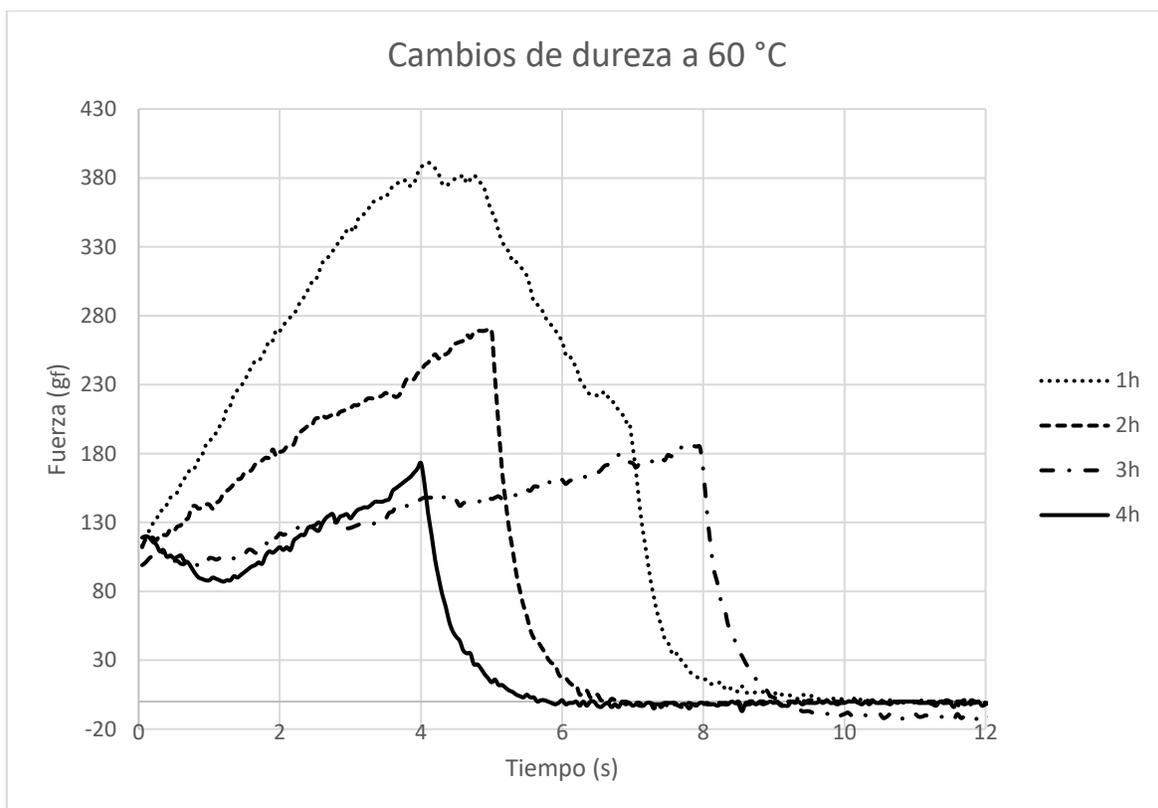


Figura 19. Cambios en dureza de cubos de manzana a 60 °C con VUS.

Se observa que la dureza disminuye con respecto al tiempo, teniendo la mayor dureza durante la primera hora y la menor a la cuarta hora. Este hecho ocurre debido a la transferencia simultánea de calor y masa durante el secado que conduce a la

tensión y el encogimiento de los productos secos (Porciuncula, Segura & Laurindo, 2016).

También se observa que el tiempo en el cual se tuvo la fuerza máxima fue diferente para cada tiempo de proceso, en donde el menor tiempo fue a la cuarta hora, esto se debió porque la muestra ha sufrido contracción y un mayor daño estructural en este tiempo, por lo que la fuerza requerida para la deformación fue menor, así como el tiempo de la prueba.

En la Figura 20 se muestra la gráfica comparativa de los dos tratamientos a la temperatura de 40 °C al final del secado (cuarta hora).

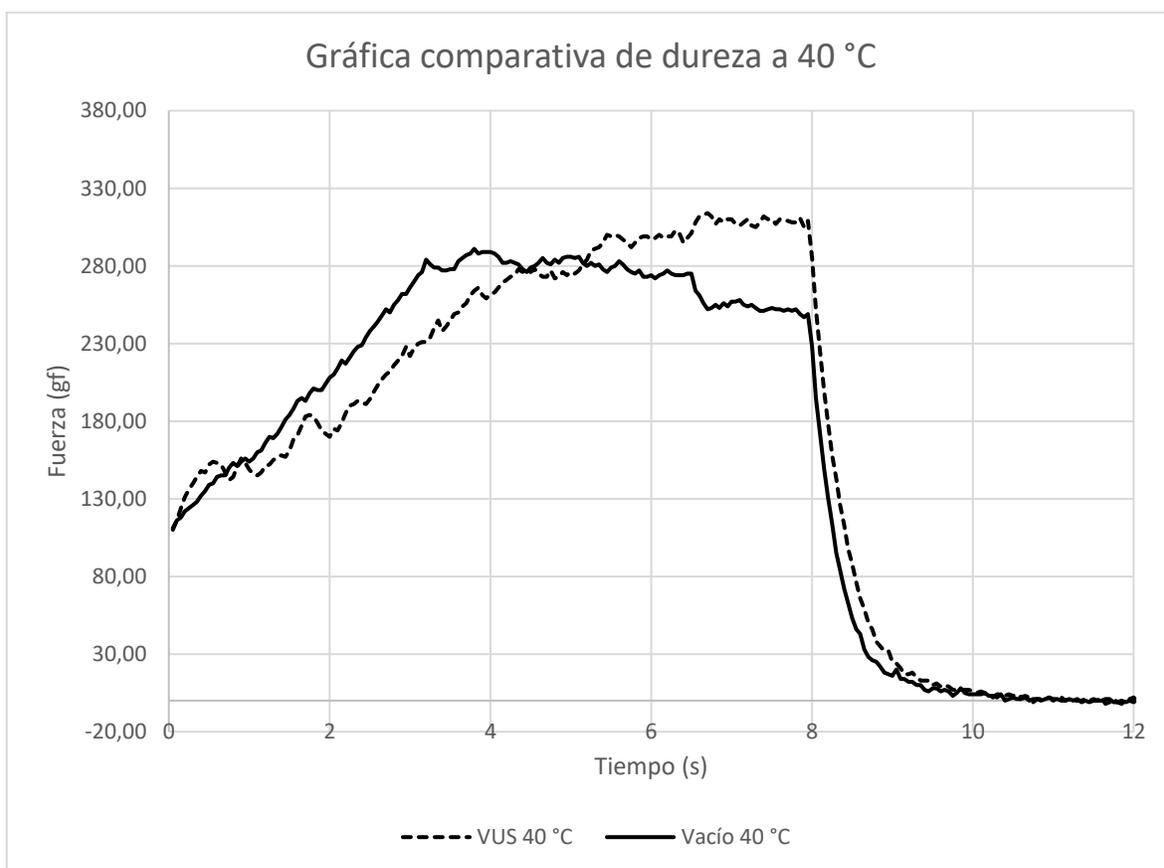


Figura 20. Dureza a vacío y VUS a 40 °C al final del proceso.

En la Figura 20 se observa que el comportamiento para ambos métodos fue diferente. Con VUS el comportamiento es ascendente teniendo varios picos hasta alcanzar la fuerza máxima (penetración de la sonda), una vez alcanzada esta se observó que la línea bajó de forma brusca (retiro de la sonda), con lo que se puede

decir que para este caso las muestras no presentaron adhesividad. Sin embargo, para el secado a vacío el comportamiento fue diferente. Donde se observa que se tuvieron más picos después de obtener la fuerza máxima, por lo que para este caso la muestra fue más adhesiva. De acuerdo con Khan *et al.* (2017) estos picos representan el punto de colapso de la membrana celular de la manzana. A esta temperatura (40 °C) la dureza disminuyó para el secado a vacío en un 79% y para el VUS en un 77% en comparación con las muestras frescas.

Gálvez *et al.* (2012) reportaron que la dureza en rodajas de manzana durante el secado disminuyó entre 61-67% en comparación con las muestras frescas.

En la Figura 21 se presenta la gráfica comparativa de la dureza para los dos tratamientos a 60 °C al final del proceso (cuarta hora).

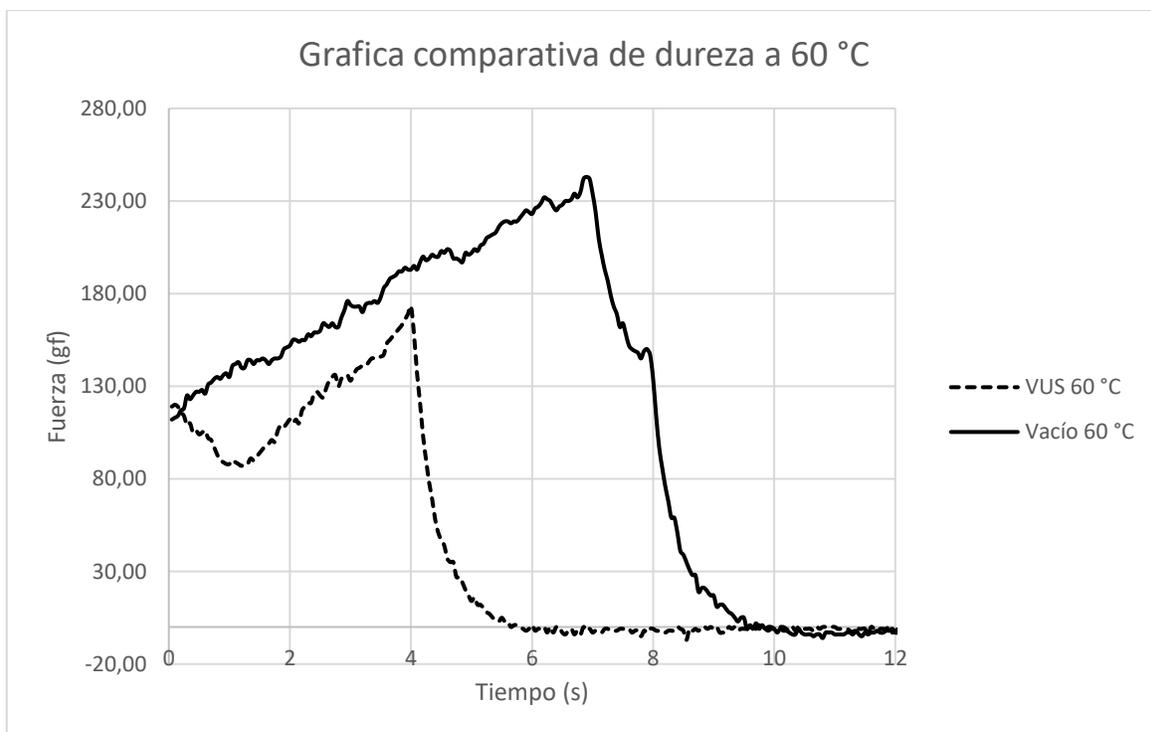


Figura 21. Dureza de manzana a vacío y VUS a 60 °C al final del proceso.

En la Figura 21 se observa que el comportamiento para ambos tratamientos fue diferente. Cuando se utilizó secado a VUS el perfil de comportamiento disminuyó y luego se requirió más fuerza para la penetración de la sonda, por lo que, este aumentó hasta alcanzar la fuerza máxima. Además, los tiempos para ambos casos

fueron diferentes, ya que la dureza para el VUS se obtuvo alrededor de los 4 segundos mientras que para vacío fue aproximadamente a los 7 segundos de prueba. Esto se debe a que la aplicación del ultrasonido interrumpe la continuidad de las membranas, lo que contribuye a la modificación de la estructura de la manzana. Además de que durante el proceso ocurre un ablandamiento de la muestra, presentando una disminución en las uniones intermoleculares, lo que ocasiona que la dureza disminuya (Torres, Gonzáles & Acevedo, 2014). A esta temperatura la dureza disminuyó para vacío en un 82%, mientras que, a VUS la diferencia fue de 87%. Contreras (2014) reportó que la dureza de la manzana fresca fue significativamente superior a las muestras secas y posteriormente rehidratadas, esto es debido a que el secado produce una degradación en la estructura de la manzana.

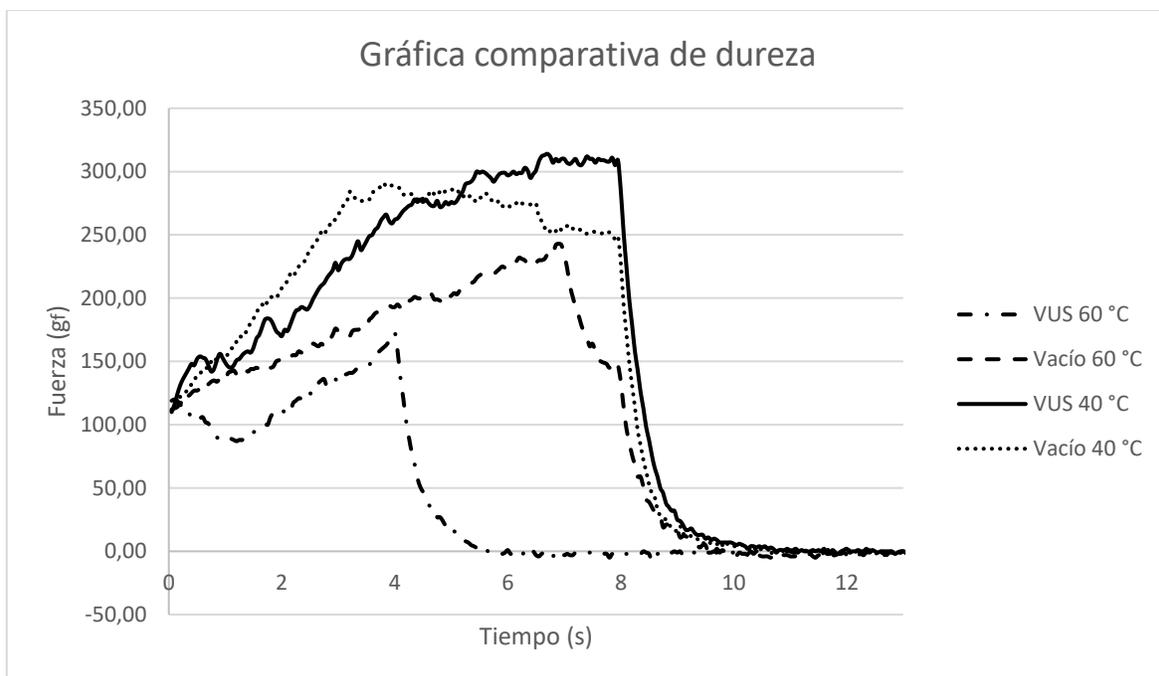


Figura 22. Dureza de manzana a diferentes condiciones de secado.

En la Figura 22 se muestra la gráfica comparativa de dureza en cubos de manzana tanto para secado a vacío como a VUS a 40 y 60 °C al final del proceso.

En términos generales, la dureza disminuyó en todos los casos con respecto al tiempo de secado (Figura 22). Esto se debe a que cuando se retira agua del alimento existe un colapso de la estructura, además de un desbalance de la presión entre la

Jose Luis Miguel Olivares 2019

estructura interna y externa de la manzana, lo que provoca que la dureza se vea modificada. En particular, en procesos de secado, la pérdida de agua y la exposición a altas temperaturas durante el proceso provocan el encogimiento celular, por consiguiente, cambios en la pared celular, particularmente en la lámina media (el inicio de la rotura de la pectina conduce a la separación celular y por consiguiente cambios en la textura de los productos obtenidos (Contreras, 2008).

También se observa que a mayor temperatura se tuvo menor dureza. Esto es debido a que, cuando la temperatura de secado es alta, la membrana celular se rompe y libera agua en el espacio extracelular y, por lo tanto, el transporte de agua hacia el exterior ocurre predominantemente a través del espacio extracelular, provocando una modificación de la estructura (Cuccurullo *et al.*, 2018).

Los resultados han confirmado la opinión de que el agua ligada migra después de la ruptura de la membrana celular. Es importante destacar que las membranas celulares se rompen en diferentes etapas de secado en lugar de colapsar de una vez. El colapso de la membrana depende principalmente de la tasa de penetración de la energía térmica y del gradiente de presión entre los entornos intracelulares e intercelulares. Todos los resultados de pruebas sugieren que la mayoría de las membranas celulares se rompen en la etapa media del secado (Khan *et al.*, 2017), por lo que a una temperatura de 60 °C la dureza fue menor. Por otro lado, a menor temperatura se tuvo mayor dureza. Estos resultados indican un menor daño a las estructuras celulares a esta temperatura y, como consecuencia, una mejor textura en los cubos de manzana.

En la Figura 23 se muestra el análisis estadístico realizado para la dureza de cubos de manzana. Se observa que el secado reduce notablemente la dureza. El mayor efecto en la dureza fue la temperatura ya que, cuando se secó a una temperatura de 60 °C la dureza disminuyó en mayor medida que a 40 °C.

Valencia & Rodríguez (2011) reportan que ello se debe a que la temperatura de secado provoca un cambio en la solubilidad de las pectinas, relacionado con un incremento de la fracción hidrosoluble y una disminución del oxalato soluble y de la pectina residual, que hace que las muestras secas presenten una menor dureza.

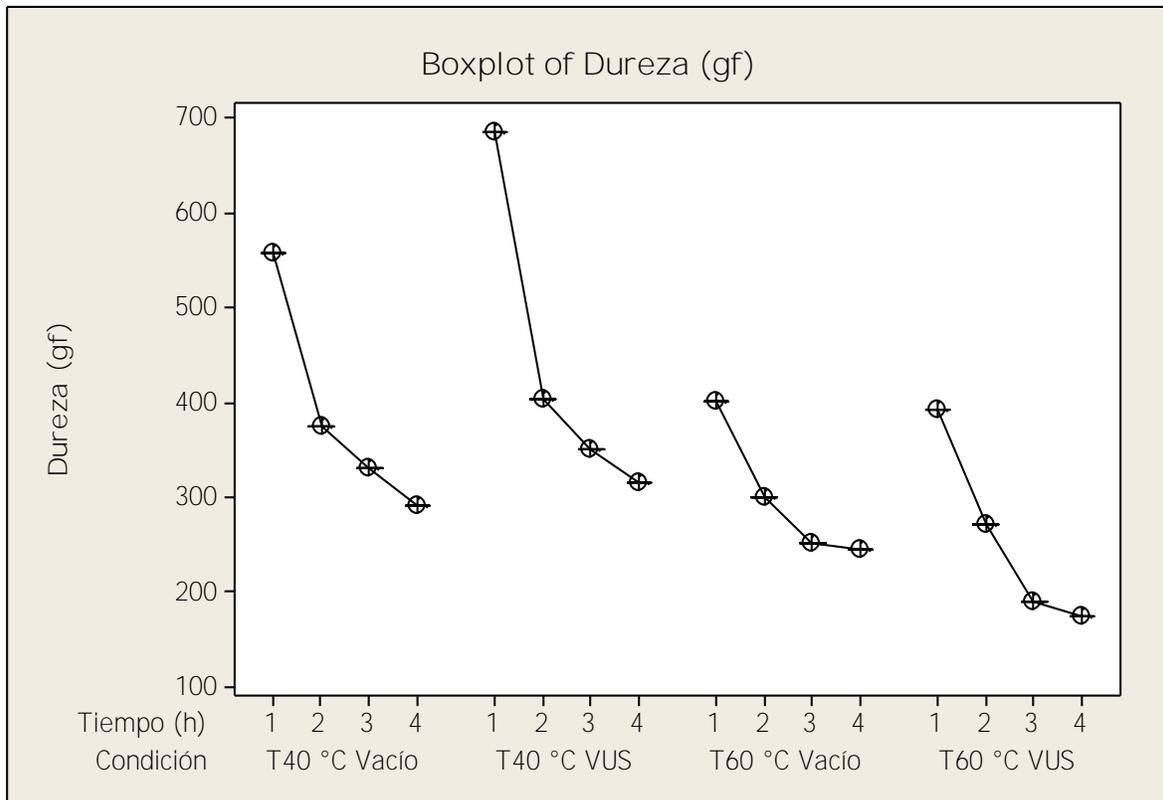


Figura 23. Análisis estadístico de la dureza en cubos de manzana.

La menor dureza se obtuvo con el secado a vacío asistido con ultrasonido a 60 °C. Esto se debe a que, en las frutas sometidas a ultrasonidos, la mayoría de las paredes celulares se rompen durante la vibración ultrasónica y hay una red de microcanales en el tejido del alimento, lo que favorece la formación de un producto seco más suave (Villamiel *et al.*, 2017).

Se encontraron resultados similares en el trabajo de Silva *et al.* (2016), en donde las muestras de melón deshidratadas osmóticamente pretratadas con ultrasonido y vacío obtuvieron una dureza menor (3034 gf y 2932 gf, respectivamente) que las pretratadas solo con vacío (3428 gf) o sin pretratamiento (3509 gf).

Sin embargo, para el caso de secado a VUS a 40 °C se observa que en este caso no tuvo el mismo comportamiento, ya que en este caso se obtuvo mayor dureza en comparación con las demás condiciones de secado, esto se debe a que el ultrasonido no tiene un efecto importante durante los primeros minutos de secado (Beck *et al.*, 2014) y por lo tanto contribuyó a preservar esta propiedad.

3.5. Energía consumida

El consumo de energía durante el proceso de secado debe considerarse al seleccionar la técnica a utilizar para disminuir el costo del proceso. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Energía consumida durante el secado de cubos de manzana.

Método de secado	Tiempo (horas)	Energía consumida (kW*h)
Vacío	4	2.50
VUS	4	1.69
Horno de secado	4	4.80

En la tabla anterior se observa que la menor energía consumida fue cuando se utilizó secado a VUS, seguido del vacío. Mientras que el horno de secado presentó el mayor consumo de energía durante las 4 horas de procesamiento. De acuerdo con Aghbashlo *et al.* (2013) esto es debido al alto calor latente de vaporización y la ineficiencia inherente de usar aire caliente como el medio de secado en el horno. Chen, Guo & Wu (2016) reportaron comportamientos similares de consumo de energía cuando se trabajó con rodajas de zanahorias a 65 y 75 °C, obteniendo valores para VUS de 1.68 y 1.24 kW*h para 5 y 2.5 horas respectivamente, con vacío de 2.18 y 1.96 kW*h a 9 y 5.5 horas.

Mientras que Baslar *et al.* (2014) informaron que la energía consumida disminuyó notablemente con VUS para carnes de res y de pollo secadas a 55, 65 y 75 °C, en comparación con los procesos de secado a vacío o al horno. La energía consumida durante el secado de las muestras de carne con USV, vacío y técnicas de horno varió entre 3.80 y 2.02 kW*h, 3.52 y 2.28 kW*h y 4.145 a 3.32 kW*h para carne de res. Mientras que para carne de pollo entre 3.20 y 2.23 kW*h, 3.62 y 2.71 kW*h y 3.85 a 3.25 kW*h, respectivamente. La energía consumida disminuyó a medida que la temperatura de secado aumentó en todos los procesos.

Por lo tanto, el VUS puede utilizarse para disminuir el consumo de energía, lo cual es muy importante para reducir el costo del proceso.

Conclusiones y recomendaciones

A partir de la revisión bibliográfica sobre el secado a vacío de alimentos se identificaron una serie de limitaciones en este proceso que se podrían suplir con la introducción de nuevas tecnologías como el ultrasonido de potencia. La utilización del ultrasonido en el secado de productos sensibles al calor presenta un elevado interés, ya que el ultrasonido no produce un aumento significativo de la temperatura del producto.

Los resultados de este estudio sugirieron que el uso de vacío asistido por ultrasonidos influye positivamente en el secado de los cubos de manzana, ya que, la velocidad de secado aumentó y se tuvo mayor remoción de humedad tanto a 40 como a 60 °C, en comparación con el secado a vacío. Por lo que puede usarse de manera efectiva para reducir el tiempo de procesamiento. Si bien el ultrasonido aceleró la tasa de remoción de humedad el efecto más importante fue la temperatura, ya que a una mayor temperatura se tuvo mayor pérdida de humedad tanto para el secado a vacío como para el vacío asistido con ultrasonido.

Con respecto al color se observa que la temperatura influyó en la pérdida de color de las muestras secas, ya que con la temperatura de 60 °C se tuvieron mayores cambios en ΔE^* . Con el vacío se trató de minimizar estas pérdidas, pero debido al bajo vacío utilizado la acción de la enzima polifenoloxidasas siguió actuando durante el proceso. La aplicación del ultrasonido redujo la acción de la enzima con lo cual se tuvo menor oscurecimiento enzimático.

La dureza no se vio afectada significativamente con la aplicación de ultrasonido a 40 °C, ya que los valores obtenidos tanto para el secado a vacío y VUS fueron similares. Sin embargo, a 60 °C se observó mayores cambios en esta propiedad. La temperatura de secado fue la que influyó en los cambios en la dureza. A una temperatura de 60 °C se tuvo menor dureza comparada con la temperatura de 40 °C. Por lo tanto, la aplicación de ultrasonido combinado con vacío puede preservar mejor las características de los alimentos secos si se trabaja a baja temperatura (40 °C).

Además, cuando se trabajó con VUS el consumo de energía fue menor, por lo tanto, este método puede ser utilizado en el secado de los productos sensibles al calor, ya que, además de aumentar la velocidad de secado y reducir el tiempo de proceso tiene bajo consumo de energía, el cual es importante para reducir los costos del proceso.

Si se desea disminuir a un más el tiempo de secado sería recomendable modificar la geometría del alimento y aumentar el vacío aplicado, el cual ayudaría también a reducir la actividad de la enzima polifenoloxidasa.

Referencias bibliográficas

- Aghbashlo, M., Mobli, H., Rafiee, S., & Madadlou, A. (2013). A review on energy analysis of drying processes and systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 1-22.
- Aguilera, J., Chiralt, A., & Fito, P. (2003). Food dehydration and product structure. *Trends in Food Science & Technology*, 14, 432-437.
- Ahmad, S., Ahsan, H., Tak, A., Mir, M., Rather, A., & Wani, S. (2018). Effect of maturity stages and postharvest treatments on physical properties of apple during storage. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 17 (3), 310-316.
- Artnaseaw, A., Theerakulpisut, S., & Benjapiyaporn, C. (2010). Drying characteristics of Shiitake mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying. *Food and Bioproducts Processing*, 88 (2-3), 105-114.
- Ashokkumar, M., Sunartio, D., Kentish, S., Mawson, R., Simons, L., Vilku, K., & Versteeg. (2008). Modification of food ingredients by ultrasound to improve functionality: A preliminary study on a model system. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9 (2), 155-160.
- Awad, T., Moharram, H., Shaltout, O., Asker, D., & Youssef, M. (2012). Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food Research International*, 48 (2), 410-427.
- Bantle, M., & Eikevik, T. (2011). Parametric study of high intensity ultrasound in the atmospheric freeze drying of peas. *Drying Technology*, 29, 1230-1239.
- Baslar, M., Klich, M., Toker, O., Sağdic, O., & Arici, M. (2014). Ultrasonic vacuum drying technique as a novel process for shortening the drying period for beef and chicken meats. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 26, 182- 190.
- Baslar, M., Klich, M., & Yalinkilic, B. (2015). Dehydration kinetics of salmon and trout fillets using ultrasonic vacuum drying as a novel technique. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 495-502.
- Başlar, M., Toker, O., Karasu, S., Tekin, Z., & Yildirim, H. (2016). Ultrasonic applications for food dehydration. *Handbook of Ultrasonics and Sonochemistry*, 1-24.

- Beck, S., Sabarez, H., Gaukel, V., & Knoerzer, K. (2014). Enhancement of convective drying by application of airborne ultrasound – A response surface approach. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 2144-2150.
- Ben, S., Benali, E., Oueslati, H. (2012). Experimental study and numerical modelling of drying characteristics of apple slices. *Food and Bioproducts Processing*, 90 (4), 719-728.
- Benítez, C. (Primera edición). (2011), Cosecha y poscosecha de peras y manzanas en los valles irrigados de la Patagonia. Rio negro, Argentina.
- Bernaert, N., Droogenbroeck, B., Pamel, E., & Ruyck, H. (2018). Innovative refractance window drying technology to keep nutrient value during processing. *Trends in Food Science & Technology*.
- Bonazzi, C., & Dumoulin, E. (2011). Quality changes in food materials as influenced by drying processes. *Modern drying technology*, 3, 1-20.
- Cao, X., & Zhang, M. (2018). Effects of ultrasonic pretreatments on quality, energy consumption and sterilization of barley grass in freeze drying. *Ultrasonidos Sonochemistry*, 40, 333-340.
- Cárcel, J., García, J., Riera, E., & Mulet, A. (2011). Improvement of convective drying of carrot by applying power ultrasound-influence of mass load density. *Drying Technology*, 29 (2), 174-182.
- Cengel, Y. (Tercera edición). (2007). *Transferencia de calor y masa*. México, DF: McGraw-Hill / Interamericana de México.
- Chandrapala, J., Oliver, C., Kentish, S., & Ashokkumar, M. (2012). Ultrasonics in food processing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 19 (5), 975-983.
- Chemat, F., Huma, Z., & Khan, M. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18 (84), 813-835.
- Chen, Z., Guo, X., & Wu, T. (2016). A novel dehydration technique for carrot slices implementing ultrasound and vacuum drying methods. *Ultrasonics Sonochemistry*, 30, 28-34.
- Chen, X., & Mujumdar, A. (2008). *Drying technologies in food processing*. Blackwell, Oxford, 225–232.

- Chiralt, A., Martínez, N., Martínez, J., Talens, P., Moraga, G., Ayala, A., & Fito, P. (2001). Changes in mechanical properties throughout osmotic processes cryoprotectant effect. *Journal of Food Engineering*, 49 (2), 129-135.
- CODEX STAN 299-2010. Norma para las manzanas.
- Contreras, C. (2006). Influencia del método de secado en parámetros de calidad relacionados con la estructura y el color de manzana y fresa deshidratadas. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Contreras, M. (2008). Influencia del método de secado en parámetros de calidad relacionados con la estructura y el color de manzana y fresa deshidratadas. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Contreras, M. (2014). Estudio de parámetros de calidad de manzana deshidratada mediante secado a baja temperatura asistido con ultrasonidos (Tesis de Licenciatura). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Cuccurullo, G., Giordano, L., Metallo, A., & Cinquanta, L. (2018). Drying rate control in microwave assisted processing of sliced apples. *Biosystems Engineering*, 170, 24-30.
- Devahastin, S., Suvarnakuta, P., Soponronnarit, S., & Mujumdar, A. (2004). A comparative study of low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. *Drying Technologies*, 22, 1845-1867.
- Demarchi, S., Irigoyen, M., & Giner, S. (2018). Vacuum drying of rosehip leathers: Modelling of coupled moisture content and temperature curves as a function of time with simultaneous time-varying ascorbic acid retention. *Journal of Food Engineering*, 233, 9-16.
- Dincer, E., & Erbas, M. (2018). Drying kinetics, adsorption isotherms and quality characteristics of vacuum-dried beef slices with different salt contents. *Meat Science*, 145, 114-120.
- Dincer, I., Ozalp, A., & Zamfirescu, C. (2015). *Drying phenomena: Theory and applications*. John Wiley & Sons.

- El poder del consumidor (2016). La manzana. Recuperado de: <http://elpoderdelconsumidor.org/saludnutricional/el-poder-de-la-manzana/>.
- Fan, K., & Zhang, M. (2017). Application of airborne ultrasound in the convective drying of fruits and vegetables: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 39, 47-57.
- Feng, H., Barbosa, G., & Weiss, J. (2011). Ultrasound technologies for food and bioprocessing, *springer*, 1, 1-12.
- Fernández, A., & Pricila, A. (2007). Estudio de la impregnación a vacío de miel y su efecto en atributos de calidad de hojuelas de manzana (Granny Smith) deshidratadas. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas.
- Fito, P., Andrés, A., Barat, J., & Albors, A. (Primera edición). (2001). Introducción al secado de alimentos por aire caliente. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Galindo, M. (2011). Influencia del tamaño de partículas coloidales de α -tocoferol sobre la actividad polifenoloxidasas, aplicadas en manzana red delicious cortada-refrigerada (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli.
- Gálvez, A., Hen, K., Chacana, M., Vergara, J., Monzó, J., Segovia, P., Mondaca, R., & Scala, K. (2012). Effect of temperature and air velocity on drying kinetics, antioxidant capacity, total phenolic content, color, texture and microstructure of apple (var. Granny Smith) slices. *Food Chemistry*, 132 (1), 51-59.
- Gallego, J., Riera, E., Blanco, S., Rodríguez, G., Acosta, G., & Blanco, A. (2007). Application of high-power ultrasound for dehydration of vegetables: Processes and devices. *Drying Technology*, 25, 1893-1901.
- Gallego, J., Rodríguez, G. & Acosta, V. (2010). Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 17 (6), 953 – 964.
- Gamboa, J., Montilla, A., Cárcel, J., Villamiel, M., & García, J. (2014). Airborne ultrasound application in the convective drying of strawberry. *Journal of Food Engineering*, 128, 132-139.

- García, J. (2007). Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de potencia en el secado convectivo de alimentos. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- García, J., Cárcel, J., Riera, E., Rosselló, C., & Mulet, A. (2012). Intensification of low temperature drying by using ultrasound. *Drying Technology*, 30, 1199-1208.
- García, J., Gómez, M., Rosell, C., Turó, A., Chávez, J., García, M., & Salazar, J. (2010). Análisis de masas alimenticias mediante sensores electrónicos de ultrasonido: Aplicación al estudio de masas de cereales. *CTC Alimentación*, 43, 16-25.
- Giri, S., & Prasad, S. (2007). Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. *Journal of Food Engineering*, 78(2), 512-521.
- Granato, D., & Masson, M. (2010). Instrumental color and sensory acceptance of soy-based emulsions: a response surface approach. *Food Science and Technology*, 30(4), 1090–1096.
- Gunasekaran, S. (1999). Pulsed microwave-vacuum drying of food materials. *Drying Technologies* 17 (3), 395-412.
- Harker, F., Gunson, F., & Triggs, C. (2006). Apple firmness: creating a tool for product evaluation based on a sensory-instrumental relationship. *Postharvest Biology and Technology*, 39, 327-330.
- Hleap, J., & Velasco, V. (2010). Análisis de las propiedades de textura durante el almacenamiento de salchichas elaboradas a partir de tilapia roja (*oreochromis sp.*). *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 8 (2), 1692-3561.
- Ibarz, A. (2005). *Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos*. México: Mundi-Prensa.
- Jangam, S. (2011). An overview of recent developments and some R&D challenges related to drying of foods, *Drying Technology*, 29 (12), 1343-1357.
- Jaya, S., & Das, H. (2003). A vacuum drying model for mango pulp. *Drying Technology*, 21 (7), 1215-1234.

- Jeltema, M., Beckley, J., & Vahalik, J. (2016). Food texture assessment and preference based on mouth behavior. *Food Quality and Preference*, 52, 160-171.
- Joardder, M., Karim, A., Kumar C., & Brown, R. (2016) Relationship between drying conditions, pore characteristics, and food quality. In: *Porosity*. SpringerBriefs Food, Health, and Nutrition, 65-68.
- Jurado, E. (2017). Efecto del proceso de escaldado en el secado de manzana variedad Golden delicious (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli.
- Khan, M., & Karim, M. (2017). Cellular water distribution, transport, and its investigation methods for plant-based food material, *Food Research International*, 9, 1-14.
- Khan, M., Nagy, S., & Karim, M. (2018). Transport of cellular water during drying: An understanding of cell rupturing mechanism in apple tissue. *Food Research International*, 105, 772-781.
- Khan, M., Wellard, R., Nagy, A., Joardder, M., & Karim, M. (2017). Experimental investigation of bound and free water transport process during drying of hygroscopic food material. *International Journal of Thermal Sciences*, 117, 266-273
- Khanizadeh, S., Tsao, T., Rekika, D., Yang, R., Charles, M., & Rupasinghe, H. (2008). Polyphenol composition and total antioxidant capacity of selected apple genotypes for processing. *Journal of Food Composition and Analysis*, 21, 396-401.
- Knorr, D., Zenker, V., Heinz, V., & Lee, D. (2004). Applications and potential of ultrasonics in food processing. *Trends in Food Science & Technology*, 15 (5), 261-266.
- Kowalski, S., Mierzwa, D., & Stasiak, M. (2016). Ultrasound-assisted convective drying of apples at different process conditions. *Drying Technology*, 35 (8), 939-947.
- Koua, B., Koffi, P., & Gbaha, P. (2017). Evolution of shrinkage, real density, porosity, heat and mass transfer coefficients during indirect solar drying of cocoa beans. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2.

- Kudra, T., & Mujumdar, A. (2009). Sonic drying. In: *Advanced Drying Technologies*. Boca Raton: CRC Press.
- Labell, F. (1993). Pink grapefruit beverages: mainstream refreshment. *Food Process*, 54 (5), 66.
- Laopoolkit, P., & Suwannaporn, P. (2011). Effect of pretreatments and vacuum drying on instant dried pork process optimization. *Meat Science*, 88, 553-558.
- Lateef, A., Oloke, J., & Prapulla, S. (2007). The effect of ultrasonication on the release of fructosyltransferase from *Aureobasidium pullulans* CFR 77. *Enzyme and Microbial Technology*, 40, 1067 – 1070.
- Lee, H. (2000). Objective measurement of red grapefruit juice color. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(5), 1507–1511.
- Leighton, T. (1998). The principles of cavitation. *Ultrasonic. Food Process*, 12, 151-178.
- Leon, K., Mery, D., Pedreschi, F., & Leon, J. (2006). Color measurement in L* a* b* units from RGB digital images. *Food Research International*, 39(10), 1084–1091.
- MacDougall, D. B. (2002). *Color in food: Improving quality*. Boca Raton, USA: CRC.
- Majid, I., Nayik, A., & Nanda, V. (2015). Ultrasonication and food technology: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 1, (1).
- Mamvura, T., & Ivuke, S. (2018). Energy changes during use of high-power ultrasound on food grade surfaces. *South African Journal of Chemical Engineering*, 25, 62-73.
- Mason, T., Chemat, F., & Ashokkumar, M. (2015). Power ultrasonics for food processing. *Power Ultrasonics*, 815-843.
- Mason, T., & Peters. D. (2002) *Practical sonochemistry: Power ultrasound uses and applications*. Philadelphia, USA: Woodhead Publishing.
- McClements, D. (1995). Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. *Trends in Food Science and Technology*, 6 (9), 293-299.

- Meléndez, A., Vicario, I., & Heredia E. (2005). Instrumental measurement of orange juice color: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85, 894-901.
- Moses, J., Norton, Y., Alagusundaram, K., & Tiwari, B. (2014). Novel drying techniques for the food industry. *Food Engineering Reviews*, 6, 43-55.
- Nakamoto, H., Nishikubo, D., & Kobayashi, F. (2018). Food texture evaluation using logistic regression model and magnetic food texture sensor. *Journal of Food Engineering*, 22, 20-28.
- Natharanakule, A., Kraiwanichkul, W., & Soponronnarit, S. (2007). Comparative study of different combined superheated-steam drying techniques for chicken meat. *Journal of Food Engineering*, 80, 1023 – 1030.
- Nisha, P., Singhal, R., & Pandit, A. (2011). Kinetic modelling of color degradation in tomato puree (*Lycopersicon esculentum* L). *Food and Bioprocess Technology*, 4, 781–787.
- NMX-F-083-1986. Alimentos. Determinación de humedad en productos alimenticios.
- Norma Técnica NTP-ISO 5492-2008. Análisis sensorial. Vocabulario.
- Nowacka, M., Wiktor, A., Sledz, M., Jurek, N., & Witrowa, D. (2012). Drying of ultrasound pretreated apple and its selected physical properties. *Journal of Food Engineering*, 113 (3), 427-433.
- Ojha, K., Tiwari, B. (2018). Effect of ultrasound technology on food and nutritional quality. *Advances in Food and Nutrition Research*. 84, 207-240.
- Oliveira, A., & Balaban, M. (2006). Comparison of a colorimeter with a machine vision system in measuring color of Gulf of Mexico sturgeon fillets. *Applied Engineering in Agriculture*, 22, 583-587.
- Paniwnyk, L. (2017). Applications of ultrasound in processing of liquid foods: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 794-806.
- Pathare, P., Opara, U., & Al-Said, F. (2013). Color measurement and analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. *Food and Bioprocess Technology*, 6 (1), 36-60.
- Patras, A., Brunton, N. P., Tiwari, B., & Butler, F. (2011). Stability and degradation kinetics of bioactive compounds and color in strawberry jam during storage. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 1245–1252.

- Pinedo, A., & Murr, F. (2006). Kinetics of vacuum drying of pumpkin (*Cucurbita maxima*): Modeling with shrinkage. *Journal of Food Engineering*, 76 (4), 562-567.
- Pinedo, A., & Murr, F. (2007). Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. *Journal of Food Engineering*, 80 (1), 152-156.
- Porciuncula, B., Segura, L., & Laurindo, J. (2016). Processes for controlling the structure and texture of dehydrated banana. *Drying Technology*, 34, 167-176.
- Powles, A., & Martin, D. (2018). Physics of ultrasound. *Physics Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 19 (4), 202-205.
- Prakotmak, P. (2013). Finite element modeling of heat and mass transfer in food materials during microwave heating. *Journal of Applied Sciences Research*, 9 (12), 6115-6121.
- Ratti, C. (2009) *Advances in food dehydration*. CRC Press, Boca Raton.
- Rhim, J., Wu, Y., Weller, C., & Schnepf, M. (1999). Physical characteristics of a composite film of soy protein isolate and propyleneglycol alginate. *Journal of Food Science*, 64(1), 149–152.
- Rodríguez, O., Santacatalina, J., Simal, S., García J., Femenia, A., & Rossello, C. (2014). Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties. *Journal of Food Engineering*, 129, 21-29.
- Rodríguez, M. (2009). El color en los alimentos. *Ciencia y tecnología de los alimentos*. Recuperado de: <http://www.consumer.es/seguridad-alimentaria/ciencia-y-tecnologia/2002/10/09/3639.php>.
- Rojas, M., Leite, T., Cristianini, M., Alvim, I., & Augusto, P. (2016). Peach juice processed by the ultrasound technology: Changes in its microstructure improve its physical properties and stability. *Food Research International*, 82, 22-33.
- Royer, G., Madieta, E., Reveillere, M., Symoneaux, R., Khaldi, H., & Jourjon, F. (2003). Preliminary study of the soil impact on apple texture. *Symposium of Food Rheology and Structure*, 645-656.
- Sabarez, H., Gallego, J., & Riera, E. (2012). Ultrasonic-assisted convective drying of apple slices. *Drying Technology*, 30(9), 989-997.

- Sabarez, H. (2015). Modelling of drying processes for food materials. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, 95-127.
- Sabarez, H. (2016). Drying of Food Materials. Reference Module in Food Science, 1-9.
- Sahin, S., & Sumnu, S. (2006). Physical properties of foods. Nueva York, USA; Springer-Verlag.
- Salazar, L. (2013). Aplicación de atmosferas modificadas en manzanas red delicious y golden delicious mínimamente procesada para el control del pardeamiento enzimático (Tesis de Licenciatura). Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Cuautitlán Izcalli.
- Santacatalina, J., Contreras, M., Simal, S., Cárcel, J., Garcia, J. (2016). Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple. Ultrasonics Sonochemistry. 28, 100-109.
- Schössler, K., Jäger, H., & Knorr, D. (2012). Effect of continuous and intermittent ultrasound on drying time and effective diffusivity during convective drying of apple and red bell pepper. Journal Food Engineering, 108 (1), 103-110.
- SIAP / SAGARPA, (2016). Manzana Mexicana. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256430/B_sico-Manzana.pdf.
- SIAP / SAGARPA, (2017). Manzana. Recuperado de: <https://www.gob.mx/siap/articulos/manzana-mexico-produjo-716-930-toneladas-en-2016?idiom=es>.
- Singh R., & Heldman, R. (Segunda edición). (2009). Introducción a la ingeniería de los alimentos. Zaragoza, España: Acribia.
- Silva, G., Barros, Z., Medeiros, R., Carvalho, C., Brandão, S., & Azoubel, P. (2016). Pretreatments for melon drying implementing ultrasound and vacuum. LWT-Food Science and Technology, 74, 114-119.
- Sun, S., Xin, L., Gao, H., Wang, J & Li, P. (2014). Response of phenolic compounds in 'Golden Delicious' and 'Red Delicious' apples peel to fruit

- bagging and subsequent sunlight re-exposure. *Scientia Horticulturae*, 168 (26), 161-167.
- Sun, Y., Zhong, L., Cao, L., Lin, W., & Ye, X. (2015). Sonication inhibited browning but decreased polyphenols contents and antioxidant activity of fresh apple (*Malus pumila* mill, cv. Red Fuji) juice. *Journal of Food Science and Technology*, 52(12), 8336-8342.
 - Tao, Y., Wang, P., Wang, Y., Kaden, S., Han, Y., Wang, J., & Zhou, J. (2016) Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry (*Morus alba* L.) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 310-318.
 - Tekin, Z., Başlar, M., Karasu, S., & Kilicli, M. (2017). Dehydration of green beans using ultrasound-assisted vacuum drying as a novel technique: Drying kinetics and quality parameters. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41, 13227.
 - Thomkapanich, O., Suvarnakuta, P., & Devahastin, S. (2007). Study of intermittent low-pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. *Drying Technology*, 25(1), 205–223.
 - Torres, J., Gonzáles, K., & Acevedo, D. (2014). Análisis del perfil de textura en frutas, productos cárnicos y quesos. *ReCiTeIA*, 64-72.
 - Toujani, M., Hassini, L., Azzouz, S., & Belghith, A. (2013). Experimental study and mathematical modeling of silverside fish convective drying. *Journal of Food Processing and Preservation*, 37, 930-938.
 - Valencia, C., & Rodríguez H. (2011). Cinética de secado y control de la oxidación en manzana Granny Smith, mediante la aplicación de diferentes tecnologías de secado. *Revista Tumbaga*. (6), 7 – 16.
 - Viera, E., Lins de Melo, L., Batista, A., Pimienta, Z., & Moreira, P. (2018). Influence of ultrasound and vacuum assisted drying on papaya quality parameters. *LWT*, 97, 317-322.
 - Villamiel, M., García, J., Montilla, A., Cárcel, J., & Benedito, J. (2017). Ultrasound in food Processing: Recent advances. *IFST Advances in Food Science*, 544.

- Vrhovsek, U., Rigo, A., Tonon, D., & Mattivi F. (2004). Quantitation of polyphenols in different apple varieties. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52, 6532-6538.
- Wang, J., Law, C., Nema, P., Zhao, J., Liu, Z., Deng, L., Gao, Z., & Xiao, H. (2018). Pulsed vacuum drying enhances drying kinetics and quality of lemon slices *Journal of Food Engineering*, 224, 129-138.
- Wu, D., & Sun, W. (2013). Color measurements by computer vision for food quality control – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 29 (1), 5-20.
- Wu, L., Orikasa, T., Ogawa, Y., & Tagawa, A. (2007). Vacuum drying characteristics of eggplants. *Journal Food Engineering*, 83, 422–429.
- Xue, K. (2004). Optimización del secado por aire caliente de pera (blanquilla) (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Yao, Y. (2016). Enhancement of mass transfer by ultrasound: Application to adsorbent regeneration and food drying/dehydration. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 512-531.
- Yilmaz, F., & Bilek, S. (2018). Ultrasound-assisted vacuum impregnation on the fortification of fresh-cut apple with calcium and black carrot phenolics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 48, 509-516.
- Zhao, F., Han, F., Zhang, S., Tian, Y., & Sun, K. (2018). Vacuum drying kinetics and energy consumption analysis of LiFePO₄ battery powder. *Energy*, 162, 669-681.
- Zhao, W., Fang, Y., Zhang, Q., Guo, Y., Gao, G & Yi, G. (2017). Correlation analysis between chemical or texture attributes and stress relaxation properties of 'Fuji' apple. *Postharvest Biology and Technology*. 129, 45-51.