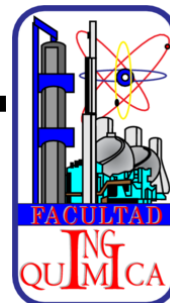




BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
COLEGIO DE INGENIERÍA EN ALIMENTOS**

“DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR CONVECTIVO (h) DURANTE EL PROCESO DE ENFRIAMIENTO POR INMERSIÓN ASISTIDO CON ULTRASONIDO DE ALTA INTENSIDAD POR MEDIO DEL PLANTEAMIENTO DE UNA SOLUCIÓN ANALÍTICA”

**TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN INGENIERÍA EN ALIMENTOS**

**PRESENTA:
GABRIELA BERENICE MORENO SOLAR**

**ASESORA DE TESIS:
DRA. EDITH CORONA JIMÉNEZ**

**CO-ASESOR DE TESIS:
DR. IRVING ISRAEL RUÍZ LÓPEZ**

ABRIL 2019. PUEBLA, PUE.

ÍNDICE

Índice de figuras	IV
Índice de tablas	V
ABSTRAC	IX
INTRODUCCIÓN	2
I Antecedentes	3
1.1 Refrigeración	3
1.2 Congelación	4
1.2.1 Nucleación	6
1.2.2 Cristalización	8
1.3 Transferencia de calor	9
1.3.1 Coeficiente de transferencia de calor por convección	10
1.4 Velocidad de congelación	13
1.4.1 Tiempo de congelación	14
1.5 Métodos para la evaluación del proceso de congelación	17
1.5.1 Solución por método numérico	18
1.5.2 Solución analítica	20
1.6 Generalidades del ultrasonido	21
1.6.1 Parámetros ultrasónicos	22
1.6.2 Clasificación del ultrasonido	24
1.6.2.1 Ultrasonido de señal	24
1.6.2.2 Ultrasonido de alta intensidad	25
1.6.3 Cavitación	25
1.6.4 Aplicación del ultrasonido en procesos de transferencia de calor	27

1.6.4.1	Aplicación del ultrasonido en procesos de congelación	29
II	Objetivo	31
III	Hipótesis	32
IV	Metodología	33
4.1	Plan de trabajo	33
4.2	Distribución de la actividad cavitacional	35
4.3	Determinación de la potencia ultrasónica	37
4.4	Solución analítica y determinación del coeficiente de transferencia de calor convectivo	38
4.5	Efecto de la irradiación en el proceso de congelación asistido con UAI en una matriz alimenticia	39
4.5.1	Evaluación de las proepiedades fisicoquímicas de la matriz alimenticia	40
4.5.1.1	Preparación de la materia prima	40
4.5.1.2	Color	40
4.5.1.3	Textura	41
4.5.1.4	Análisis de imagen	41
V	Resultados	42
5.1	Desarrollo de la solución analítica	42
5.2	Distribución de la actividad cavitacional	43
5.3	Determinación de la potencia ultrasonica	47
5.4	Determinación del coeficiente de transferencia de calor convectivo (h)	49
5.5	Efecto de la irradiación en el proceso de congelación asistido con UAI en una matriz alimenticia	52
5.6	Determinación de las propiedades fisicoquímicas de la papa	55
5.6.1	Color	56
5.6.2	Textura	58
5.6.3	Análisis de imagen	59
VI	Conclusiones	63
	Bibliografía	65

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Diagrama de flujo de ciclo de compresión del vapor	4
1.2	Curva de congelación típica que muestra un proceso de congelación .	6
1.3	Clasificación de la nucleación	8
1.4	Relación entre la convección en la superficie del cuerpo con respecto a la conducción dentro de éste	13
1.5	Propagación de una onda ultrasónica	24
1.6	Clasificación del sonido de acuerdo a su frecuencia	24
1.7	A) Crecimiento e implosión de las burbujas de cavitación en un medio líquido durante la aplicación de ondas ultrasónicas de alta intensidad; B) Ciclos de compresión y descompresión de la burbuja	26
4.1	Plan de trabajo	34
4.2	Esquema de las dimensiones interiores del baño de ultrasonido . . .	36
4.3	Esquema de la posición (A) y profundidad (B) del termopar en el baño de ultrasonido	37
5.1	Cinéticas de enfriamiento a tres diferentes posiciones [1 (A), 2 (D) y 3 (G)] y dos profundidades (25 y 55mm) con solución analítica y datos experimentales en una esfera de cobre. Ajuste entre los datos experimentales y los calculados a partir de la solución analítica en las posiciones 1 (B y C), 2 (E y F) y 3 (H e I) y en las profundidades de 25 mm (B, E y H) y 55mm (C, F e I). Media \pm desviación estándar (n = 3).	44
5.2	A) Cinéticas de enfriamiento con datos experimentales y los calculados a partir de la solución analítica en la posición 2 y profundidad de 25 mm dentro del baño, en una esfera de cobre. Media \pm desviación estándar (n = 3). B) Ajuste entre los datos experimentales y los calculados a partir de la solución analítica en la curva control.	46

5.3	Curva de la relación de temperatura de una solución de Etilenglicol 50 % obtenida en la posición 2 y una profundidad de 25 mm dentro del baño de UAI, con interacción con el entrono (A) y sin interacción con el entorno (B). Media \pm desviación estándar (n = 3).	48
5.4	Cinéticas de enfriamiento en esfera y cubo de cobre con datos experimentales y los calculados analíticamente, con y sin aplicación de UAI a 0 °C. (A y C) y -5°C (B y D). Media \pm desviación estándar (n = 3) . .	50
5.5	Curvas de congelación en cubos de papa y parámetros evaluados. A) Convencional, B) 7 segundos con UAI y C) 10 segundo con UAI. . . .	54
5.6	Análisis de imagen en muestras de papas congeladas mediante técnica convencional (A) Control exterior, (B) Control interior y con aplicación de UAI (C) 7s exterior, (D) 7s interior, (E) 10s exterior y (F) 10s interior	60
5.7	Análisis de imagen en muestras de papas descongeladas mediante técnica convencional (A) Control exterior, (B) Control interior y con aplicación de UAI (C) 7s exterior, (D) 7s interior, (E) 10s exterior y (F) 10s interior	61

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Valores para P y R para diferentes geometrías	15
1.2	Aplicación del ultrasonido en procesos alimentarios	28
4.1	Propiedades termo físicas del etilenglicol-agua	36
4.2	Ecuación diferencial de transferencia de calor en coordenadas rectangulares y esféricas.	38
5.1	Soluciones para la conducción transitoria unidimensional en una pared plana de espesor 2L y una esfera de radio r0, sujetos a convección desde todas las superficies.	43

5.2	Valores del coeficiente de transferencia de calor h y la correlación R^2 en distintas posiciones y profundidades dentro del baño ultrasónico durante el enfriamiento de una esfera de cobre a 0 °C.	45
5.3	Valores del coeficiente de transferencia de calor h y la correlación R^2 en esfera y cubo a dos diferentes temperaturas con y sin aplicación de UAI.	51
5.4	Valores obtenidos de L^* y de las coordenadas a^* y b^* en muestras de papa congeladas con y sin aplicación de UAI y muestras frescas. . . .	56
5.5	Valores obtenidos de C^* , ΔE^* y h° en muestras de papa congeladas con y sin aplicación de UAI y muestras frescas	57
5.6	Parámetros de firmeza en muestras de papa congeladas (control y con aplicación de UAI a 7 y 10s) y papas frescas.	59

Agradecimientos

Agradezco a todas aquellas personas e instituciones que contribuyeron en el trabajo de este proyecto:

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, a la Facultad de Ingeniería Química y al Cuerpo Académico Consolidado BUAP-CA-176 “Innovación en Tecnología para el Desarrollo de Procesos Alimentarios” ya que el presente trabajo se hizo dentro de sus instalaciones.

A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP), por el apoyo económico brindado para la adquisición del material utilizado en el desarrollo del presente trabajo dentro del “Programa Institucional de Fomento a la Investigación y a la Consolidación de Cuerpos Académicos”.

A mi asesora de tesis, la Dra. Edith Corona Jiménez por confiar en mí y aceptarme en su equipo de trabajo, por guiarme durante cada etapa del proyecto, por el conocimiento compartido y por todas las horas invertidas para la conclusión de este proyecto.

A mi co-asesor, el Dr. Irving Israel Ruiz López, por su apoyo y conocimiento para la culminación de este proyecto.

A los miembros del jurado, el Dr. Álvaro Sampieri Croda y el Dr. Juan José Luna Guevara por tomarse el tiempo para la revisión de este proyecto, así como la aportación de sus valiosas contribuciones.

A todo el equipo de trabajo de la Dra. Edith Corona, por su apoyo y tiempo invertido. A mi compañera de trabajo la Mtra. Tania Martínez quien me apoyo durante la realización del proyecto.

Por ultimo quiero agradecer a todas aquellas personas que me brindaron apoyo durante los buenos y malos momentos contribuyendo en el desarrollo de este proyecto.

A mis papas Francisco y Carmen por todo el cariño, apoyo, tiempo y comprensión incondicional. A mis hermanos por el apoyo y confianza, a mi hermano Guillermo por su cariño, confianza y por ser mi admiración. A Ricardo por ser mi compañero y mi equipo día a día, por su cariño, comprensión y todo el apoyo en cada momento. A mis amigos y compañeros Ana, Ernesto, Karla, Castora y Alin por la confianza, por sus consejos y por todo el apoyo y animo cuando lo necesite.

Resumen

El enfriamiento mantiene la seguridad de los alimentos y además es capaz de conservar las características sensoriales iniciales de los productos alimenticios. Sin embargo, los métodos convencionales pueden causar daño a los productos. Como tecnología de congelación asistida, el Ultrasonido de Alta Intensidad (UAI) ha demostrado ser un método útil en el fenómeno de transferencia de calor por convección durante el enfriamiento. No obstante, para comprender los fenómenos termodinámicos que ocurren durante el enfriamiento es necesario el uso de herramientas matemáticas que generen una solución precisa de los fenómenos que ocurren durante el proceso. Por ello es importante evaluar la congelación por inmersión asistida con UAI mediante la determinación del coeficiente de transferencia de calor convectivo (h), por medio de la aplicación de una solución analítica a la ecuación de transferencia de calor en estado transitorio, esto con el fin de conocer el fenómeno involucrado. Para ello se determinó la distribución cavitacional dentro de un baño ultrasónico en tres posiciones y dos profundidades (25 y 55mm) por medio de la realización de cinéticas de enfriamiento. La muestra enfriada fue una esfera de cobre y el medio de inmersión fue etilenglicol (50 % v/v) a 0°C. Se calculó la potencia real entregada al medio, así como la intensidad, para posteriormente determinar h a través de cinéticas de enfriamiento en cubo y esfera de cobre a 0 y -5°C con y sin aplicación de UAI y usando la solución analítica. Por otro lado, se observó el efecto de la aplicación del ultrasonido en muestras de cubo de papa, realizando cinéticas de congelación a una temperatura promedio de -10°C (sin y con aplicación de UAI (7s y 10s)). Finalmente para evaluar físicamente el efecto del fenómeno de cavitación sobre las muestras de papa durante su congelación se realizaron pruebas de textura, color y análisis de imagen. El lugar dentro del baño que mostró el menor tiempo de enfriamiento (36s) y el mayor valor de h (1497.70W/m²°C) fue la posición 2 en la profundidad de 25 mm. La potencia e intensidad en ese lugar fue de 107.5587W y 2129.8752W/m² respectivamente. Los valores de h obtenidos de las cinéticas y la solución analítica mostraron que los mayores valores se obtuvieron en la geometría de cubo con y sin aplicación de UAI en comparación con los de la esfera. De manera general los mayores valores de h se obtuvieron en todas las curvas irradiadas con el ultrasonido, siendo el mayor valor en cubo a 0°C con apli-

cación de UAI ($2589.78\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$). Finalmente, las curvas de congelación obtenidas de papa revelaron que los valores de temperatura de nucleación para las tres curvas fueron similares, sin embargo el tiempo de congelación fue menor para la curva control, concluyendo que posiblemente la composición del alimento y el tiempo de exposición cavitacional podrían influir en dicho comportamiento. Sin embargo, los parámetros de color y textura revelaron que la congelación convencional por sí sola cambia los parámetros, quitándole cierta luminosidad y brillo, no afectando a la textura, dando valores muy similares entre la muestra fresca y las congeladas, asimismo, el ultrasonido no afectó de manera importante el color y textura de las papas durante su aplicación en la congelación. Por lo tanto, se concluyó que el ultrasonido aceleró la transferencia de calor convectiva, disminuyendo los tiempos de enfriamiento, existiendo una relación entre la intensidad ultrasónica y el coeficiente de transferencia convectivo, sin embargo, presentó una transferencia de calor conductiva menor a la congelación convencional, siendo similar a ésta, pero no afectando las propiedades fisicoquímicas de las muestras de papa.

Abstrac

Low temperatures methods can keep safe food products and also preserve their initial sensory characteristics. However, conventional methods can cause damage to the products. The High Intensity Ultrasound (UAI) as an assisted-freezing technology has proven to be a useful method in the phenomenon of convective heat transfer during cooling. However, to understand the thermodynamic phenomena that occur during cooling, it is necessary to use mathematical tools that generate an accurate solution of the phenomena that occur during the process. Therefore, it is important to evaluate the freezing-assisted with UAI through the determination of the coefficient of convective heat transfer (h), using an analytical solution to the transient heat transfer equation, this in order to know the phenomenon involved. For that purpose, the cavitation distribution within an ultrasonic bath was determined in three positions and two depths (25 and 55mm) performing a cooling kinetics. The cooled sample was a copper sphere and the immersion medium was ethylene glycol (50%v / v) at 0° C. The real power and the intensity delivered to the medium were calculated, then, the value of h was calculated through cooling kinetics in a cube and copper sphere at 0 and -5° C with and without application of ultrasound and using the analytical solution. On the other hand, the effect of the ultrasound application on potato cube samples was evaluated performing freezing kinetics at -10 ° C (without and with the application of UAI (7s and 10s)). Finally, the effect of the cavitation on the potato samples during freezing was studied through texture, color and image analysis tests. The results showed that the place within the bath that showed the shortest cooling time (36s) and the highest value of h (1497.70W/m²°C) was position 2 at the depth of 25mm. The power and intensity in that place was 107.5587W and 2129.8752W/m², respectively. The results of h from the kinetics and the analytical solution showed that the highest values were obtained in the cube geometry with and without application of UAI in comparison with those of the sphere. In general, the highest values of h were obtained in all the cur-

ves irradiated with the ultrasound, being the highest value in cube at 0 °C (2589.78W/m²°C). Finally, the results for the freezing curves obtained from potato showed that the nucleation temperature values for the three curves were similar; however, the freezing time was shorter for the control curve, concluding that the composition of the food and the time of cavitation could have an influence in their behavior. Nevertheless, the color and texture parameters revealed that conventional freezing has an influence on these parameters, decreasing the luminosity and brightness, but the texture was not affected due to similar values between the fresh and frozen samples were obtained. The ultrasound did not affect the color and texture of the potatoes during their application in freezing in an important way. Therefore, it was concluded that ultrasound accelerated convective heat transfer, decreasing cooling times, there being a relationship between the ultrasonic intensity and the convective transfer coefficient, however, presented a conductive heat transfer lower than conventional freezing being similar to this one, but not affecting the physicochemical properties of the potato samples.

Introducción

La conservación de los alimentos es una faceta fundamental de la ciencia y tecnología actual de los alimentos, siendo quizás el principal objetivo de esta disciplina, así mismo mantener la calidad nutricional tanto como sea posible y evitar el crecimiento de microorganismos no deseados. Los alimentos de alta calidad para hombres, más demandados, son también los más altamente perecederos. Afortunadamente, los alimentos más perecederos se pueden hacer estables mediante la aplicación de la tecnología actual. Una de las tecnologías más utilizadas para la conservación de alimentos es el uso de bajas temperaturas, tanto refrigeración como congelación. La refrigeración es el método por el cual el alimento es enfriado, pero sin que ocurra un cambio de fase del agua que está dentro del mismo, y la congelación, por el cual el agua del alimento cambia de fase (líquido- sólido) (Barreiro & Sandoval, 2006). Los métodos convencionales de enfriamiento y congelación pueden causar daño a los alimentos como daño celular, daño fisicoquímico, y a las características sensoriales. Se han desarrollado nuevos métodos de enfriamiento y congelación para generar menos daños a los alimentos, como el enfriamiento asistido con ultrasonido de alta intensidad, éste es capaz de acelerar el proceso de enfriamiento en los alimentos. Durante el proceso de congelación la cavitación generada promueve la nucleación del hielo y acelera la transferencia de calor y masa. El uso de UAI es muy prometedor, sin embargo se han realizado pocos estudios en el proceso de enfriamiento en matrices alimentarias. Los estudios realizados en vegetales como rábano, champiñón, fresa, entre otros, se han enfocado en la calidad final del producto enfriado, pero no en el modelado de los procesos de enfriamiento. Es necesario realizar más investigaciones para comprender el proceso de enfriamiento asistido con ultrasonido así como el fenómeno de transferencia de energía mediante el uso de herramientas matemáticas que ayuden a comprender mejor el fenómeno generando modelos matemáticos que pueden describir de forma confiable el proceso de enfriamiento en el alimento.

I. Antecedentes

1.1. Refrigeración

La inocuidad de los alimentos se relaciona con la ausencia de patógenos y toxinas, por lo que cuando los alimentos se consumen no deben de general enfermedades en los consumidores, mientras que la calidad de un alimento se refiere al valor nutricional y la percepción del sabor, la textura y el aspecto, es por ello que la refrigeración se ha convertido en parte esencial de la cadena alimentaria, se utiliza desde el procesamiento del alimento hasta la distribución, la venta y el consumo final en el hogar. El proceso de refrigeración consiste en eliminar el calor del alimento a conservar para mantener una cierta temperatura de almacenamiento, que normalmente está entre 0 y -10°C, con el objetivo de reducir la actividad de los microorganismos, enzimas, y las reacciones químicas y biológicas. Se debe de tener presente que el procesos de refrigeración de un alimento no puede mejorar la calidad de un producto pobre, y tampoco detiene los procesos de deterioro, solo puede ralentizarlos. El enfriamiento de los alimentos tanto líquidos como sólidos se realiza mediante diversos procesos y equipos, basados en los principios de transferencia de calor. Entre los métodos más usados para la reducir la temperatura se encuentra la compresión mecánica, la absorción de amoníaco, evaporación de fluidos criogénicos, y el uso de hielo, siendo el sistema de compresión mecánica del vapor el más importante. Este ciclo consta principalmente de cuatro componentes principales: un compresor, un condensador, una válvula de expansión y un evaporador. La Figura 1.1 muestra el ciclo de compresión de vapor estándar, aquí se indica que el vapor del refrigerante 1 del evaporador es comprimido por el compresor a vapor de alta presión 2, que después se condensa en el condensador y ahora es líquido. El calor de la condensación se desecha al ambiente. El líquido 3 sale del condensador, luego pasa a través de una válvula de expansión para experimentar una reducción de presión y después fluye al evaporador donde se evapora. El calor latente de evaporación necesario es suministrado por la carga de enfriamiento generando así la refrigeración. El vapor 4 sale del evaporador y finalmente fluye al compresor para completar el ciclo (Association *et al.*, 1997; Sun, 2016; Tassou *et al.*, 2010)

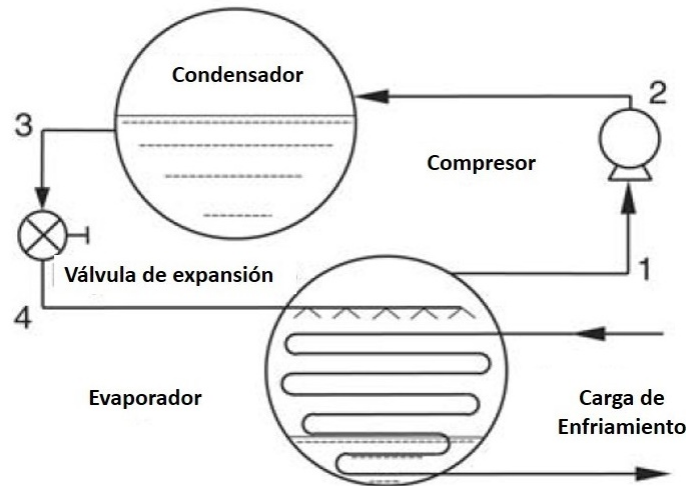


Figura 1.1. Diagrama de flujo de ciclo de compresión del vapor

1.2. Congelación

La congelación es un método adecuado para retardar el deterioro de los alimentos, preservando sus propiedades organolépticas principalmente (Biglia *et al.*, 2016) debido a que las bajas temperaturas reducen las reacciones químicas nocivas en el alimento e inhiben el crecimiento de microorganismos patógenos (Năstase *et al.*, 2016). El término congelación se refiere al proceso en el cual la temperatura del alimento se reduce a una temperatura inferior a su punto de congelación, mientras que el término congelado se usa para describir el estado posterior en que se mantiene el alimento, es decir, el mantenimiento del alimento (James *et al.*, 2015). El proceso de congelación de alimentos tiene dos características únicas en comparación con la congelación del agua pura. La primera es que la temperatura de equilibrio para la formación inicial de cristales de hielo es más baja que la temperatura de equilibrio para la formación de cristales de hielo en agua pura, puede ocurrir que el proceso de sobre-enfriamiento en el alimento ocurra antes de que se forme el cristal de hielo inicial y la temperatura será inferior a la de un sistema de agua pura. La segunda característica que hace diferente la congelación de un alimento a la del agua pura ocurre después de que se forman los cristales de hielo iniciales. La eliminación de la energía de cambio de fase ocurre gradualmente en un rango de temperaturas decrecientes del alimento. La relación temperatura-tiempo durante el cambio de fase es una función del porcentaje de agua congelada en cualquier momento del proceso

de congelación Heldman *et al.* (2018). El método más común para medir el punto de congelación en los alimentos es por la curva de enfriamiento. Las curvas de enfriamiento son gráficas de tiempo-temperatura que permiten obtener la tasa y el tiempo de congelación del centro térmico del alimento desde 0 a -5°C (zona de formación de cristal máxima) y de 0 a -18°C (congelación casi completa) (Bainy *et al.*, 2015).

La forma general de las curvas de enfriamiento se muestra en la Figura 1.2. Se observan tres etapas principales (Salvadori, 1994):

- **Enfriamiento:** En este periodo el alimento se enfría desde su temperatura inicial, que generalmente es mayor que 0°C , hasta la temperatura de comienzo de cambio de fase.

- **Cambio de fase:** Aquí se lleva a cabo la nucleación y el crecimiento de cristales de hielo. El tamaño de los cristales dependerá de la velocidad de transferencia de calor. La congelación de los alimentos no sucede a los 0°C como sucede con el agua pura, esto se debe a que la mayoría de ellos están constituidos por una matriz de sólidos insolubles y una fase acuosa que contiene una cierta cantidad de sólidos disueltos; es así que la congelación del agua del alimento comienza a una temperatura menor a la temperatura inicial, por lo que la magnitud del descenso crioscópico es proporcional a la concentración inicial de sólidos.

- **Atemperado:** Esta etapa consiste en enfriar el alimento ya congelado hasta la temperatura final. Los valores más utilizados en la práctica son -10°C y -18°C . Aquí la conversión de parte del agua en hielo da lugar a un incremento en la concentración de diversas sales en el agua líquida remanente (VELAZQUEZ RODRIGUEZ *et al.*, 2014).

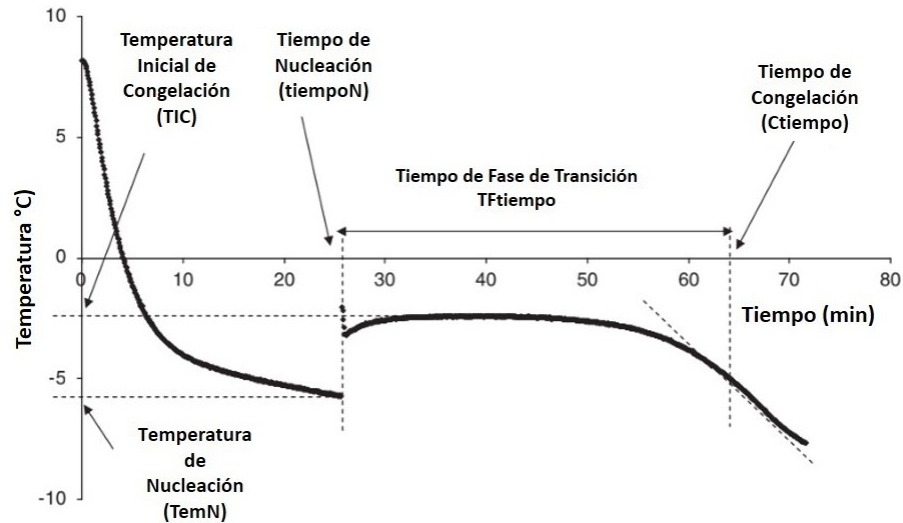


Figura 1.2. Curva de congelación típica que muestra un proceso de congelación

La temperatura de nucleación (T_{emN}) es la temperatura más baja, alcanzada por la muestra durante la fase de enfriamiento, sin formación de hielo. Si la dimensión del núcleo cristalino excede el radio crítico para la nucleación, la fase de enfriamiento se detiene y se comienza a liberar calor latente en el sistema, aumentando de forma rápida la temperatura desde T_{emN} hasta la congelación hasta la temperatura inicial de congelación (TIC) generando el pico de nucleación en la curva (Rahman *et al.*, 2002). El tiempo de aparición del pico de nucleación se define como el tiempo de nucleación (TiempoN). No todas las curvas son iguales, ya que dependerán de su forma de velocidad de remoción de calor, la geometría del producto, empaque, el modo de transferencia de calor y las propiedades térmicas del alimento (Barreiro & Sandoval, 2006).

1.2.1. Nucleación

Para que se lleve a cabo la congelación del agua dentro de la matriz es necesario obtener temperaturas por debajo del punto de congelación antes de que el hielo comience a formarse. Cuando se llega a un sub-enfriamiento en el proceso de congelación (Ecuación 1.1) se comienzan a generar los núcleos de congelación.

$$\Delta T_s = T_f - T \quad (1.1)$$

Donde T_f es el punto de congelación del agua pura, T son temperaturas por debajo del punto de congelación. Así, durante la nucleación se libera el calor latente de solidificación, en donde las moléculas se agregan en una partícula ordenada que sirven como sitio para un mayor crecimiento de los cristales. En la superficie de los cristales, hay un intercambio constante de moléculas de agua entre la fase sólida y líquida. Para una partícula de radio r , el proceso se gobierna por la energía libre de formación, acompañada por una condensación líquido-sólido (ΔG_{1-s}), la cual está dada por la Ecuación 1.2.

$$\Delta G_{1-s} = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma \quad (1.2)$$

Donde r es el radio de la partícula, ΔG_v es la diferencia de la energía libre entre la fase sólida y acuosa, y γ es la energía libre interfacial por unidad de área entre el hielo y la fase sin congelar (Gómez-Sánchez *et al.*, 2007). El punto de fusión de un cristal está en función de su curvatura; por lo que, para una temperatura dada habrá un radio crítico que define el tamaño mínimo que un cristal puede tener y ser estable. La ecuación general de la velocidad de nucleación (Ecuación 1.3), se expresa como el número de núcleos formados por unidad de volumen y tiempo.

$$J = C T \exp\left(\frac{-B T_f^2}{\Delta T_s^2 T}\right) \quad (1.3)$$

Donde B y C son coeficientes que depende del tipo de producto en el que se produce la nucleación, T la temperatura del sistema, ΔT_s el sobre-enfriamiento y T_f la temperatura inicial de congelación del sistema (Sun, 2016).

Existen dos diferentes tipos de nucleación dependiendo el crecimiento de los cristales (Figura 1.3). En la nucleación primaria existe formación de cristales en una solución que no contiene cristales preexistentes. La nucleación primaria se clasifica en homogénea y heterogénea (Gómez-Sánchez *et al.*, 2007; Reid, 2012; Sahagian & Goff, 1996). Por un lado, la nucleación homogénea es en la que la formación del cristal dentro el sistema se genera espontáneamente. Este tipo de nucleación es raro incluso en sustancias puras, debido a la presencia de superficies y partículas extrañas que entran en contacto con el sistema que cristaliza. Por otro lado, la nucleación heterogénea es cuando existe alguna forma de superficie catalítica sobre la cual se puede formar un núcleo. Las superficies catalíticas reducen la energía necesaria para formar el núcleo crítico, consecuentemente, reducen el grado de sub-enfriamiento. Este

tipo de nucleación es el más importante en el proceso de congelación de alimentos. Las moléculas de agua se ensamblan en el agente causal (superficie catalítica) como las paredes del contenedor, en cuerpos extraños o en material insoluble. La nucleación secundaria describe procesos en los que los centros de crecimiento se producen por alguna fragmentación de un cristal existente en un gran número de centros de crecimiento, para que se lleve a cabo la fragmentación se requiere de la presencia de fuerzas externas. Las proteínas simples actúan como inhibidores de este tipo de nucleación.

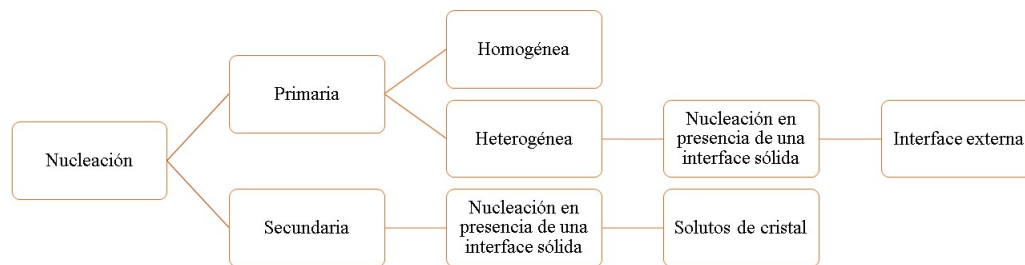


Figura 1.3. Clasificación de la nucleación

1.2.2. Cristalización

La cristalización es un término general para describir varios fenómenos diferentes relacionados con la formación de una estructura reticular cristalina. El proceso consiste en dos etapas sucesivas principales, nucleación y crecimiento cristalino. La interacción entre estos dos pasos determina las características del cristal, el tamaño, la distribución y la morfología de los cristales (Kiani & Sun, 2011). Los primeros cristales iniciales que aparecen al comienzo de la cristalización proporcionan una plantilla estructural sobre la cual todo el material se deposita en forma de cristales. Las principales teorías utilizadas para explicar el fenómeno del crecimiento de los cristales incluyen la energía de la superficie, la capa de adsorción y las teorías de la reacción de difusión. El crecimiento de los cristales se considera como un proceso de adición molecular a una superficie líquido-sólido que se ve afectada por diferentes factores que influyen en el crecimiento de los cristales, como la difusión masiva, la difusión de la superficie, entre otras. El principal factor de control es la tasa de unión de la molécula a la superficie, la cual se describe como la tasa de transferencia de masa y el intercambio de energía del cristal y la mayor parte de la

muestra, que se describe como la transferencia de calor. La relación entre el grado de sobre-enfriamiento y el crecimiento de los cristales de hielo se describe por la Ecuación 1.4, donde β y n son las constantes experimentales y ΔT_s es el grado de sobre-enfriamiento. Durante el crecimiento de los cristales de hielo, el intercambio de calor en la superficie del cristal entre el cristal de hielo sólido y el líquido residual es un factor importante (Zhang *et al.*, 2015).

$$G = \beta (\Delta T_s)^n \quad (1.4)$$

1.3. Transferencia de calor

La transferencia de calor ocurre desde un cuerpo con alta temperatura a un cuerpo de baja temperatura. Esta transferencia se lleva a cabo de tres formas distintas, por conducción, convección y radiación. En los sistemas de refrigeración generalmente solo se produce la conducción y la convección de calor. La transferencia de calor por conducción se lleva a cabo a través de una masa continua o de un cuerpo en contacto con otro. La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas a las menos energéticas debido a la interacción entre las mismas. Es posible cuantificar el proceso de conducción en términos de las ecuaciones apropiadas, en este caso el modelo que describe el fenómeno de transferencia de calor por conducción por unidad de tiempo es la ley de Fourier (Ecuación 1.5).

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1.5)$$

El flujo de calor por unidad de área Q (W/m^2) es la velocidad con que se transfiere el calor en la dirección X por área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura, dT/dx en esta dirección. La constante de proporcionalidad k es una propiedad de transporte conocida como conductividad térmica ($W/m^\circ C$) y es una característica del material. El signo menos es consecuencia del hecho de que el calor se transfiere en la dirección de la temperatura decreciente (Incropera & De Witt, 1999; Sun, 2016).

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida, y el líquido o gas adyacente que están en movimiento y comprenden los efectos

combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes números de moléculas se mueven de forma colectiva o como agregados. Tal movimiento, en presencia de gradientes de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. La transferencia de calor por convección se clasifica de acuerdo con la naturaleza del flujo en:

- Convección forzada. Si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento.
- Convección natural. Si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por la diferencia de densidad, debidas a la variación de la temperatura en ese fluido. La transferencia de calor por convección depende de ciertas propiedades como la viscosidad dinámica (μ), la conductividad térmica (k), la densidad (ρ) y el calor específico (C_p) del fluido, así como la velocidad del mismo (Gengel, 2007). La ley de enfriamiento de Newton (Ecuación. 1.6) se usa para determinar la tasa de transferencia de calor por convección.

$$Q = hA (T_{sup} - T_f) \quad (1.6)$$

Donde h es un parámetro determinado experimentalmente, definido como el coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/ m^2\text{°C}$), y su naturaleza depende de muchos factores relevantes, como la naturaleza del fluido, sus propiedades y la geometría de la superficie.

1.3.1. Coeficiente de transferencia de calor por convección

El coeficiente de transferencia de calor por convección (h) no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina de forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo. Éste se puede definir como la razón de la transferencia de calor entre una superficie por unidad de diferencia en la temperatura (Incropera, 1999; (Gengel, 2007). El coeficiente de transferencia de calor, entre el alimento y el medio de enfriamiento es un parámetro relevante del proceso de enfriamiento, pues este describe la efectividad del intercambio de calor

y se puede calcular a partir del número *Nusselt* (*Nu*) (Ecuación. 1.7). Modelar la forma del alimento utilizando formas geométricas elementales (cilindro, esfera, plano, etc.) permite evaluar el número *Nu* por formulación empírica como una función de los números de *Reynolds* (*Re*) (Ecuación. 1.8) y *Prandtl* (*Pr*) (Ecuación. 1.9) (Biglia *et al.*, 2016).

$$Nu = h \frac{L}{k} \quad (1.7)$$

$$Nu = f(Re, Pr)$$

Donde

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (1.8)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (1.9)$$

Donde *L* es la longitud característica (m) y *k* es la conductividad térmica (W/m °C) de la muestra, ρ es la densidad del medio de enfriamiento (Kg/m³), *V* (m/s) es la velocidad del medio de enfriamiento, *C_p* es el calor específico del medio de enfriamiento (J/Kg °C) y μ es la viscosidad del medio de enfriamiento (Pa s).

De acuerdo con Biglia *et al.* (2016) para calcular *h* a partir de *Nu* es necesario considerar la geometría del alimento. Para alimentos con una superficie predominante como rebanadas de fruta o verduras, hamburguesas, entre otros, *Nu* se puede calcular aproximadamente de acuerdo a la Ecuación 1.10 y 1.11.

$$Nu = 0.037 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (1.10)$$

Con

$$5 \times 10^5 \leq Re \leq 10^7 \text{ y } 0.6 \leq Pr \leq 60$$

$$Nu = 0.664 Re^{0.5} Pr^{1/3} \quad (1.11)$$

Con

$$Re < 5 \times 10^5$$

Para volúmenes de forma cilíndrica como zanahorias, salchichas y pepinos, con fluido medio perpendicular a la superficie lateral se debe de usar la ecuación de *Churchill y Bernstein* (Ecuación. 1.12) (*Biglia et al.*, 2016).

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62Re^{0.5}Pr^{1/3}}{\left(1 + (0.4/Pr)^{2/3}\right)^{0.25}} x \left(1 + (Re/282000)^{5/8}\right)^{4/5} \quad (1.12)$$

Con

$$Re.Pr > 0.2$$

Y para alimentos esféricos como chicharos, cerezas, arándanos y blueberry, la ecuación que los describe es la Ecuación. 1.13.

$$NU = 2 + \left(0.4Re^{0.5} + 0.06Re^{2/3}\right) Pr^{0.4} x \left(\frac{\mu_{medio}}{\mu_{Alimento}}\right) \quad (1.13)$$

Con

$$3.5 \leq Re \leq 8x10^4, 0.7 \leq Pr \leq 380$$

Debido a que h es un parámetro que se calcula experimentalmente, es muy importante su cálculo en fenómenos de transferencia de calor por convección para evaluar la eficiencia del método con el que está sucediendo el fenómeno. Cuando la transferencia de calor se lleva a cabo dentro de un fluido y en el sistema se lleva a cabo una transferencia de energía por convección y por conducción al mismo tiempo, es necesario hacer una relación entre resistencia conductiva interna y resistencia convectiva externa. La Figura 1.4 muestra un sistema donde están sucediendo los dos fenómenos en un cuerpo sólido y la relación entre estos dos fenómenos se representa por medio de la Ecuación 1.14.

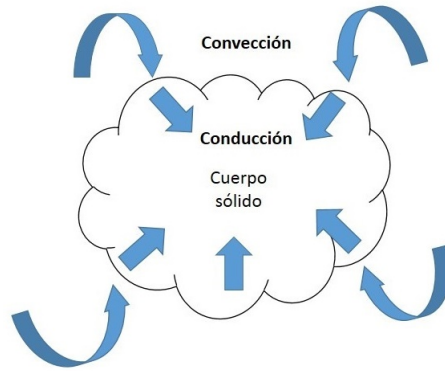


Figura 1.4. Relación entre la convección en la superficie del cuerpo con respecto a la conducción dentro de éste

$$\frac{hL}{k} = \frac{L/k}{1/h} = N_{Bi} = \frac{\text{Resistencia a la conducción interna}}{\text{Resistencia a la convección externa}} \quad (1.14)$$

Donde N_{Bi} es el número de *Biot* y representa la razón de la resistencia interna de un cuerpo a la conducción de calor con respecto a su resistencia externa a la convección de calor. Un número grande de *Biot* (> 40) significa que la resistencia externa a la transferencia de calor es grande, mientras que un número pequeño de *Biot* (< 0.2) implica que el producto tiene una resistencia muy pequeña a la transferencia de calor y la conductividad térmica del objeto es alta (Gengel, 2007). Donde, h es el coeficiente de transferencia de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$), L es la longitud característica (volumen/área) y k es la conductividad térmica ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$). El número de *Biot* tiene la misma forma que el número de *Nusselt*, con una diferencia significativa, que la conductividad térmica (k) en *Biot* es del sólido, mientras que en *Nusselt* es la conductividad térmica del fluido. El número de *Nusselt* es una representación adimensional del coeficiente de transferencia de calor, mientras que *Biot* describe la condición límite para la conducción térmica en un sólido (Erdogdu, 2008).

1.4. Velocidad de congelación

La tasa de congelación es el factor más importante en el proceso ya que con ello se puede evitar el daño de los tejidos alimenticios y la pérdida de goteo. Si se lleva a cabo una congelación rápida habrá una formación de cristales pequeños y por ende una mejor calidad de los alimentos congelados. El tiempo de congelación se define como el tiempo requerido para disminuir la temperatura del producto desde

su valor inicial hasta un valor objetivo en su centro térmico o el tiempo transcurrido entre el inicio de la congelación hasta que se congela completamente el producto. La tasa de congelación puede ser estimada como a) la diferencia entre la temperatura inicial y final del producto dividida por el tiempo de congelación ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$) o b) la distancia entre la superficie y el centro térmico dividido por el tiempo transcurrido hasta alcanzar la temperatura del centro térmico a -15°C cuando la superficie se encuentre a 0°C (cm/h). Las tasas de congelación varían en el rango de 0.2 a 10 cm/h en aplicación comercial. En congelaciones lentas, el rango está entre 0.2 y 0.5 cm/h , mientras que para congelación rápida el rango varía de 0.5 a 3 cm/h (Bulut *et al.*, 2018). Los factores que influyen en el tiempo de congelación de los alimentos se deben a las características del alimento y las condiciones del equipo en el cual se va a llevar a cabo el proceso. Para la congelación de un alimento es necesario conocer su conductividad térmica, sus dimensiones y su temperatura inicial, mientras que del equipo se necesita considerar el coeficiente convectivo de transferencia de calor (h), el medio de congelación y la temperatura a la cual se encuentra éste (Gómez-Sánchez *et al.*, 2007).

1.4.1. Tiempo de congelación

El tiempo de congelación es un criterio de diseño básico para los sistemas de congelación, representa el tiempo de residencia que debe permanecer el producto alimenticio dentro del sistema para alcanzar el nivel deseado de congelación. El tiempo de congelación se refiere al tiempo requerido para reducir la temperatura del producto desde una magnitud inicial a una temperatura final establecida. La temperatura final del producto se establece como la magnitud necesaria para mantener la calidad óptima del producto durante su almacenamiento Heldman *et al.* (2018). El método más utilizado para predecir el tiempo de congelación se basa en la ecuación de Plank (1913) (Ecuación 1.15).

$$t_F = \frac{\rho L}{T_f - T_1} \left[\frac{Pa}{h_c} + \frac{Ra^2}{k} \right] \quad (1.15)$$

El cálculo del tiempo de congelación con la ecuación de Plank está en función de las propiedades del alimento congelado, las cuales son el calor latente de fusión (L , KJ/Kg), la densidad (ρ , Kg/m^3) y la conductividad térmica (k , $\text{kW}/\text{m}^{\circ}\text{C}$). Las

constantes P y R dependen de la geometría del producto (Tabla 1.1) donde para una placa infinita será el espesor total, y para el caso de un cilindro infinito o una esfera lo será el diámetro (Erickson & Hung, 2012). La ecuación de Plank también depende de los parámetros relacionados con el proceso, donde se implica la diferencia de temperatura entre el medio de congelación y el producto o alimento ($T_f - T_1$, °C) y el coeficiente de transferencia de calor (h , W/m²°C). Sin embargo, la ecuación de Plank tiene limitaciones para la estimación de los tiempos de congelación de los alimentos, ya que se debe seleccionar una magnitud de calor latente, y un valor apropiado para la conductividad térmica. Además la ecuación no considera el inicio del proceso de congelación, es decir no toma en cuenta el tiempo requerido para eliminar el calor sensible de la etapa de enfriamiento.

Tabla 1.1. Valores para P y R para diferentes geometrías

Forma Geométrica	P	R
Placa infinita	0.5	0.125
Cilindro infinito	0.24	0.0625
Esfera	0.167	0.04167

Se han realizado varias modificaciones de la ecuación de Plank donde se desarrollan mejoras en las predicciones. Cleland & Earle (1984) desarrollaron una modificación donde utilizan la ecuación de Plank en forma adimensional (1.16). Aquí se toma en cuenta la eliminación de calor sensible por encima y por debajo del punto de congelación inicial de los alimentos, así como la variación de la temperatura durante el proceso de congelación.

$$t_f = \frac{\rho \Delta H_{ref}}{E (T_f - T_1)} \left[\frac{Pa}{h_c} + \frac{Ra^2}{k} \right] \left(1 - \frac{1.65 N_{Ste}}{k} \ln \left[\frac{T - T_1}{T_{ref} - T_1} \right] \right) \quad (1.16)$$

Donde T_{ref} , es la temperatura de referencia y E es igual a 1 para una placa infinita, 2 para un cilindro infinito y 3 para una esfera. T_{ref} toma el valor de -10 °C y ΔH_{ref} es el cambio de entalpia de T_f a (Cleland & Earle, 1984; Heldman et al., 2018).

La influencia del calor sensible sobre la congelación se incorpora al introducir el número de Plank (Ecuación 1.17)

$$N_{pk} = \frac{c_p u (T_i - T_F)}{\Delta H} \quad (1.17)$$

Los valores de las constantes (P y R) se determinan mediante las relaciones entre el número de Plank y el número de Stefan (Ecuación 1.18)

$$N_{Ste} = StefanNo. = \left(\right) \frac{CpF(T_{\infty} - T_{F0})}{\Delta H} \quad (1.18)$$

Pham (1985 y 1986) presenta una mejora a la ecuación de Plank donde se toman en cuenta consideraciones que no son ciertas en la práctica: 1) existe un punto de congelación donde se libera todo el calor sensible y 2) que la conductividad térmica es constante por debajo de la congelación. Por lo tanto, en esta ecuación se considera una temperatura de congelación media y los efectos del calor sensible; mostrando también que el tiempo de congelación viene dado por la ley de enfriamiento de Newton (Ecuación 1.19)

$$t = \frac{V}{hA} \left(\frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) \frac{1}{B1_s/4} \quad (1.19)$$

Donde

$$\Delta H_1 = c_u (T_i - T_{fm}) \quad (1.20)$$

$$\Delta H = L + c_s (T_{fm} - T_c) \quad (1.21)$$

$$\Delta T_1 = \frac{T_i + T_{fm}}{2 - T_a} \quad (1.22)$$

$$\Delta T_2 = T_{fm} - T_a \quad (1.23)$$

T_{fm} se obtiene de la Ecuación 1.24

$$T_{fm} = 1.8 + 0.263T_c + 0.105T_a \quad (1.24)$$

Donde A (m^2) es el área de transferencia de calor, h ($W/m^2\text{°C}$), es el coeficiente de transferencia de calor por convección. En esta ecuación se considera que la temperatura del ambiente (T_a) y la temperatura inicial son constantes, estableciendo un valor fijo de la temperatura inicial del producto (T_c); ΔH_1 (J/m^3) es el cambio de entalpia volumétrico durante el cambio de fase y periodo de enfriamiento; ΔH_2 (J/m^3) es el cambio de entalpia volumétrico de sub-enfriamiento; Cp_f y Cp ($J/m^3\text{°C}$) son el calor específico volumétrico de la muestra congelada y sin congelar, respectivamente; ΔT_1 y ΔT_2 , son los gradientes de temperatura; T_{fm} (°C) es la temperatura

media de congelación. La principal limitación de esta ecuación es el uso de una única fuerza impulsora de temperatura ($T_{fm}-T_a$) para describir la transferencia de calor durante el periodo de congelación y sub-enfriamiento, es decir el método predice de forma incorrecta que el tiempo de congelación permanece infinito cuando T_c es igual a T_a Pham (1984,8).

1.5. Métodos para la evaluación del proceso de congelación

Existen diferentes formas para modelar el proceso de congelación. Para realizar un modelado del proceso es necesario tomar en cuenta los requisitos necesarios para lograr la reducción de temperaturas deseadas así como los requisitos involucrados en la eliminación del calor sensible y calor latente del producto. El diseño del proceso también requiere del conocimiento del tiempo necesario para reducir la temperatura del producto hasta el nivel deseado. El diseño de los sistemas está en función de los cambios que ocurren dentro de la estructura del producto durante la congelación, la influencia que tienen estos cambios en las propiedades del producto y los cálculos del tiempo de congelación (Erickson & Hung, 2012). Los métodos disponibles para las predicciones van desde simples ecuaciones semi-teóricas hasta programas informáticos muy avanzados basados en diferencias finitas y técnicas de elementos finitos. (Cleland *et al.*, 1986) presentaron un resumen de una cantidad de métodos proporcionando además una evaluación crítica. Los primeros métodos que menciona son considerando el cambio de fase a una única temperatura, basadas en la suposición de que todo el calor latente se libera o se absorbe a una temperatura única, generando un cambio en las propiedades térmicas. Las soluciones de estos métodos pueden ser analíticas aproximadas, empíricas o numéricas y se dividen de acuerdo a la geometría a la que se apliquen. Los otros métodos son considerando que el cambio de fase ocurre en un rango de temperatura, estos métodos de predicción toman en cuenta que el cambio de fase puede ocurrir en un cambio de temperatura y se consideran cuatro clases de soluciones, soluciones analíticas aproximadas para la solidificación de aleaciones, métodos de solución semi-analítica, empírica y numérica.

1.5.1. Solución por método numérico

La evaluación del proceso de congelación se puede hacer a través de sistemas de computación de alta velocidad y métodos numéricos apropiados que resuelven complejas ecuaciones diferenciales parciales con propiedades dependientes de la temperatura. Las predicciones de las propiedades térmicas del producto se pueden usar para resolver las ecuaciones por métodos de elementos finitos y de diferencias finitas, donde se predicen los historiales de distribución de temperaturas del producto. MANNAPPERUMA & SINGH (1988) propusieron un método (Ecuación 1.25) de predicción asistido por computadora utilizando el enfoque de la formulación de entalpía donde el cambio de fase tiene lugar en un rango de temperatura extendido. El método se resuelve por diferencias finitas utilizando criterios de estabilidad para la formulación de la entalpía

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{1}{r^m} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^m k \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (1.25)$$

donde m es igual a 0, 1 y 2 para coordenadas rectangulares, cilíndricas y esféricas respectivamente. La temperatura (T) y la conductividad térmica (k) dependen de la entalpía (H) (Ecuación 1.26 y 1.27).

$$T = T(H) \quad (1.26)$$

$$k = k(H) \quad (1.27)$$

Las condiciones límites en las superficies expuestas en la congelación de alimentos son temperaturas fijas ($T = T_s$) y de tipo convectivos (Ecuaciones 1.28 y 1.29). En casos unidimensionales con simetría, el flujo de calor en el centro de la simetría se utiliza como condición límite adicional ($T = T_1$).

$$k \frac{\partial T}{\partial r} = h (T_a - T_s) \quad (1.28)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (1.29)$$

Kiani & Sun (2016) desarrollaron una solución numérica para la simulación de calor por convección forzada entre una esfera y un medio de circulación enfriado en presencia o ausencia de ultrasonido por medio de la evaluación de diferentes

fórmulas de números de *Nusselt* (Nu) y el estudio de la irradiación con ultrasonido en el proceso de transferencia de calor. La ecuación de transferencia de calor durante el enfriamiento asistido (Ecuación 1.30) se implementó en un software de dinámica de fluidos computacional para poder resolverla.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) = \nabla (k \nabla T) + S_{US} + S_p \quad (1.30)$$

Considerando que

$$S_{US} = \rho Q_{US} \quad (1.31)$$

Donde T es la temperatura, ρ es la densidad, C_p es el calor específico, k es la conductividad térmica S_{US} es el término de origen causado por el cambio de fase, y Q_{US} es el calor generado por la sonicación (Ecuación 1.32).

$$bQ_{US} = \frac{m C_{p_s} \frac{\Delta T_{US}}{\Delta t}}{A} \quad (1.32)$$

Donde m es la masa de la esfera, C_{p_s} es el calor específico de la esfera y ΔT_{US} es el incremento de la temperatura generado por la irradiación del ultrasonido; A es el área de la superficie de la esfera. Para la solución se utilizaron condiciones iniciales y límites (Ecuaciones 1.33, y 1.35).

$$\nabla T(0, t) = 0 \quad (1.33)$$

$$-k \nabla T(R, t) = h [T(R, t) - T_\infty] \quad (1.34)$$

$$T(x, y, z, 0) = T_i \quad (1.35)$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor convectivo y se estima usando las correlaciones que relacionan *Nusselt* (Nu) (Ecuación 1.7), con *Reynold* (Re) (Ecuación 1.8) y *Prandtl* (Pr) (Ecuación 1.9). Para el enfriamiento asistido con ultrasonido se adoptó la ecuación de Kiani (Ecuación 1.36)

$$Nu_{US} = Nu + 0.005 I_{US} \quad (1.36)$$

donde I_{US} es la intensidad del ultrasonido y Nu_{US} es el número Nu que se presentó en el ultrasonido.

Los métodos numéricos mencionados en este apartado resultan ser adecuados para predicciones en ciertos parámetros durante los procesos de enfriamiento y congelación de un alimento asistido con UAI, sin embargo presentan algunas pequeñas desventajas como los cálculos del tiempo, se requiere de más investigación para incluir otros factores presentes durante los procesos de enfriamiento y congelación asistidos. El método basado en la formulación de la entalpia resultó ser un enfoque simple para modelar los procesos de congelación y descongelación en un alimento, prediciendo los tiempos, así como la distribución de la temperatura en el alimento, pero al mismo tiempo mostro desventaja con el incremento del tiempo por el uso de excesivo de interpolaciones debido a que el modelo utiliza dos variables dependientes, resultando que el tiempo calculado se incremente. Finalmente el modelo numérico de simulación de calor por convección forzada logro predecir las curvas de enfriamiento y congelación de acuerdo con los resultados experimentales con pequeñas diferencias, sin embargo la elección de una correlación de Nu adecuada fue crítica obteniendo correlaciones con diferentes resultados. Es necesario entonces realizar más investigación para involucrar otros parámetros como la tasa de flujo y la frecuencia del ultrasonido en diferentes posiciones.

1.5.2. Solución analítica

Debido a que las soluciones numéricas requieren de importantes instalaciones informáticas y los cálculos involucrados son demasiado numerosos, se han desarrollado diferentes soluciones analíticas, que son otro método de modelar el proceso de congelación de una forma más sencilla. Kiani & Sun (2016) evaluaron experimentalmente el proceso de congelación asistido por ultrasonido en esferas de papa y compararon los resultados con la solución analítica y numérica del fenómeno de transferencia de calor dentro de las muestras. La ecuación propuesta por Pham (Ecuación 1.24) para el cálculo del tiempo de congelación se utilizó en este estudio. Para evaluar la transferencia de calor por convección unidimensional durante la congelación en una esfera sólida se empleó la Ecuación 1.37, donde r es la distancia desde el centro a lo largo del radio, α es la difusividad térmica, T es la temperatura y t es el tiempo. Durante el proceso de congelación la transferencia de calor por convección y conducción ocurre simultáneamente y para estudiar el gradiente de

temperatura se introduce el número Bi (Ecuación 1.15).

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \quad (1.37)$$

Si el número Bi es inferior a 0.1, se puede ignorar el gradiente de temperatura en la muestra. Las condiciones iniciales y de contorno fueron las mismas que se utilizaron en el desarrollo numérico (Ecuaciones 1.33, 1.34 y 1.35). También consideraron el calor generado por el ultrasonido debido a la cavitación (Q_{US}) (Ecuación 1.31). Al resolver la ecuación considerando analíticamente el límite y las condiciones iniciales se obtuvo la Ecuación 1.38.

$$T = \frac{\left(\exp \left(\frac{hA}{\rho V C p_s} \right) t \right) \left[h (T_0 - T_m) \right] - Q_{US}}{h} + Q_{US} \quad (1.38)$$

Al realizar las curvas de T vs t con diferentes condiciones ultrasónicas y utilizando la (Ecuación 1.37), se obtuvieron los valores de h . Los valores de h calculados se utilizaron posteriormente para la simulación numérica. El modelo analítico utilizado para el cálculo del tiempo de congelación en papas tuvo una sobrestimación, ya que el tiempo mostró un acuerdo cualitativo con los resultados con errores de entre 11.6 % y el 27.5 %, y un promedio del 20.1 %, Es necesario seguir con investigaciones para desarrollar otros modelos analíticos, tomando en cuenta ciertos parámetros involucrados en la congelación asistida con el ultrasonido donde se describa mejor el comportamiento de los alimentos durante el proceso de congelación.

1.6. Generalidades del ultrasonido

El ultrasonido comprende ondas mecánicas que necesitan un medio elástico para expandirse. Las ondas de ultrasonido tienen una frecuencia superior a la de la audición humana, pero por debajo de las frecuencias de microondas (20KHz a 10MHz). El criterio para la clasificación del ultrasonido depende de la cantidad de energía generada, caracterizada por la potencia del sonido (W), la intensidad del sonido (W/m^2) o la densidad de energía del sonido (W/m^3) (Pico, 2013). El uso de la energía de las ondas de ultrasonido es una técnica para mejorar la velocidad de varios procesos de transferencia de calor, como el cambio de fase, la ebullición y la convección, además, se ha mostrado (Rostami *et al.*, 2018) un aumento en la eficiencia de

enfriamiento mediante la aplicación de ondas de ultrasonido. El micro-streaming y la cavitación son los principales efectos físicos de la propagación de ultrasonido en un líquido, provocando un movimiento del fluido, siendo la cavitación el fenómeno en donde al aplicar dichas ondas en un medio líquido éstas generan pequeñas burbujas, así como se desintegran otras burbujas más grandes en otras más pequeñas, afectando a los fenómenos de transporte.

1.6.1. Parámetros ultrasónicos

El ultrasonido, como cualquier tipo de onda, se caracteriza por una serie de parámetros (Figura 1.5) como la velocidad, atenuación, frecuencia, longitud de onda, entre otros. La amplitud (A) se refiere a la elongación máxima o máxima distancia de cualquier punto de la onda media respecto a su posición de equilibrio, expresada en unidades de longitud (m). La longitud de onda (λ) es la distancia que existe entre dos puntos sucesivos que se encuentran en el mismo estado vibracional (misma elongación, velocidad, aceleración). Se determina a partir de la velocidad y la frecuencia y se expresa en unidades de longitud (m); el periodo (T) es el tiempo necesario para describir una oscilación completa o el tiempo empleado que ocupa la onda para recorrer una longitud. Se expresa en unidades de tiempo (s) (Ecuación 1.39), mientras que la frecuencia (f) es el número de oscilaciones por unidad de tiempo, siendo su unidad es el Hercio (Hz = 1/s) (Ecuación 1.40). La frecuencia y el periodo se relacionan mediante la Ecuación 1.41.

$$T = \frac{\text{tiempo}}{\text{oscilaciones}} \quad (1.39)$$

$$f = \frac{\text{oscilaciones}}{\text{tiempo}} \quad (1.40)$$

$$T = \frac{1}{f} \leftrightarrow \frac{1}{T} \quad (1.41)$$

Otros parámetros que se calculan a partir de los términos anteriores son la velocidad acústica (V), la cual se define como la velocidad de propagación de onda y es una constante para un determinado material en determinadas condiciones y en general solo depende de sus propiedades físicas (módulo de elasticidad y densidad),

aunque puede verse afectada por variables ambientales como la temperatura y presión. La velocidad se relaciona con la longitud y frecuencia de onda (Ecuación 1.42) y la intensidad (I), ésta se refiere a la energía media transmitida a través de la unidad de área perpendicular a la dirección de propagación de la onda por unidad de tiempo. La intensidad acústica es proporcional al cuadrado de la presión acústica máxima y se obtiene con la Ecuación 1.43.

$$V = \lambda f \quad (1.42)$$

$$I = \frac{P_A^2}{2\rho c} \quad (1.43)$$

Donde I es la intensidad acústica (W/m^2), P_A es la presión máxima (Atm), ρ es la densidad del medio (Kg/m^3) y c es la velocidad de la onda en el medio (m/s). La densidad de energía es el trabajo realizado al remplazar las partículas del medio, que por otra parte, está sujeto a fuerzas contrarias al desplazamiento del propio medio elástico. Para una onda plana, la densidad de energía se puede expresar como (Ecuación 1.44).

$$E = \frac{I}{c} \quad (1.44)$$

Donde E es la densidad de energía (J/m^3). Puesto que la energía (J) se puede expresar en Newton por metro (Nm), las unidades de la densidad de energía se transforman en N/m^2 , que son unidades de presión. Por lo tanto, la densidad de energía de una onda corresponde con el nivel de presión acústica. Otros parámetros importantes involucrados en el ultrasonido son la potencia acústica (p), que es la energía total irradiada por una fuente por unidad de tiempo. Se puede calcular con la Ecuación 1.45. Finalmente, la atenuación es la reducción del nivel de señal, cuando pasa a través de un elemento, la intensidad de la energía aplicada disminuye con el espesor del material, siendo amortiguada en tasas diferentes según el tipo de material, la amortiguación se debe a los efectos interactivos de la densidad, dureza, viscosidad y estructura molecular. El principal mecanismo de atenuación de la onda es la absorción, que retiene y convierte en calor a la energía.

$$P = IS \quad (1.45)$$

Donde S representa el área de la superficie radiante (m^2) y P la potencia acústica (W).

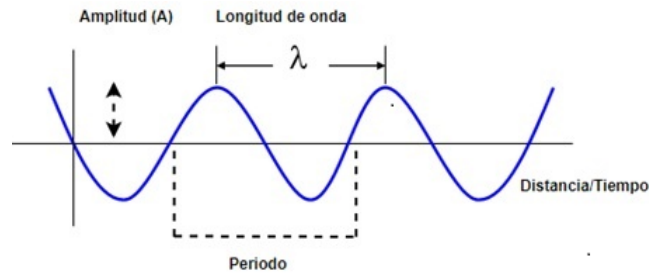


Figura 1.5. Propagación de una onda ultrasónica

1.6.2. Clasificación del ultrasonido

De acuerdo con información del centro de Sono química de la Universidad de Coventry en el Reino Unido, (Centre, 2006) el ultrasonido es usado para realizar evaluaciones no invasivas ni destructivas y además por ser fuente de energía. De acuerdo a este criterio sus aplicaciones se pueden dividir en ultrasonido de señal y de potencia (Figura 1.6).

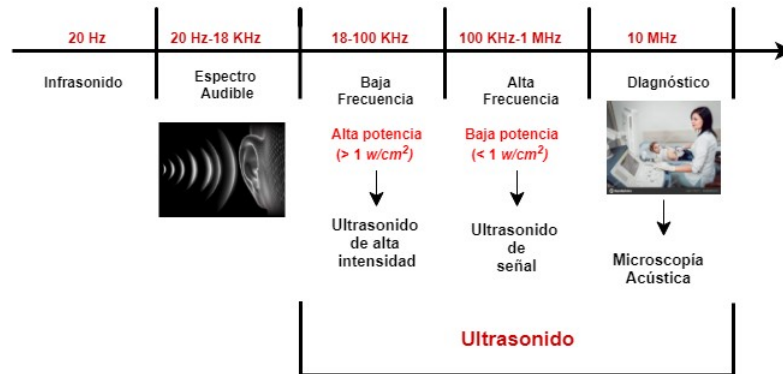


Figura 1.6. Clasificación del sonido de acuerdo a su frecuencia

1.6.2.1. Ultrasonido de señal

Ultrasonido de baja intensidad con alta frecuencia (100KHz-1MHz) este ultrasonido tiene una baja potencia comúnmente menor 1 w/cm^2 , se utiliza en pruebas de análisis no destructivo, particularmente para la evaluación de la calidad de un pro-

ducto. Este es muy utilizado como una técnica analítica para proporcionar información sobre las propiedades fisicoquímicas de los alimentos como firmeza, madurez, contenido de azúcar y acidez (Pico, 2013). Algunos ejemplos de aplicaciones en la industria alimentaria son la medida del grosor de la cáscara de huevo, detección de agujeros en quesos y papas, medición del estado de maduración de los melones y aguacates, determinación de propiedades reológicas del queso, propiedades de textura en frutas y determinación de la edad de huevos y papas. Se han realizado también estudios con frecuencias sónicas por debajo de 20KHz para determinar propiedades de textura en manzanas, kiwi y melocotón (Abbott & Liljedahl, 1994; Abbott & Massie, 1995) ya que las pruebas ultrasónicas de baja intensidad no son destructivas permiten exámenes rápidos de muchas piezas (Azuola & Aguilar, 2007; Mulet *et al.*, 1999).

1.6.2.2. Ultrasonido de alta intensidad

Este ultrasonido es de baja frecuencia (16-100KHz) y alta potencia comúnmente entre 10 a 100W/cm², es utilizado para modificar las propiedades físicas y químicas de procesos y productos. El ultrasonido de alta intensidad es aplicado para mejorar la limpieza, la destrucción microbiana y la inactivación enzimática, además también en operaciones como extracción, secado, deshidratación osmótica y la filtración. El ultrasonido de potencia tiene un efecto directo sobre los procesos de transferencia de calor y cristalización, volviéndolo en una técnica prometedora para el proceso de congelación (Comandini *et al.*, 2013; Pico, 2013).

1.6.3. Cavitación

Existen dos fenómenos de gran importancia que mejoran la transferencia de calor, la cavitación acústica y la transmisión acústica (acousting streaming). Existen otros efectos posteriores, como el calentamiento del medio debido a la disipación de la energía mecánica (Legay *et al.*, 2011). La cavitación acústica es el principal fenómeno que surge de la propagación de ondas ultrasónicas en un líquido. Se trata de la formación, crecimiento, oscilación y el fuerte colapso de las burbujas de gas en un líquido. Cuando la presión local se reduce lo suficiente por debajo de la presión de vapor durante el periodo de rarefacción de la onda de ultrasonido, la presión estáti-

ca y las fuerzas de cohesión se superan y se forman burbujas de gas, generalmente estas burbujas oscilan, crecen y luego colapsan violentamente, durante el colapso se produce una presión adiabática rápida de gases y vapores dentro de la burbuja produciéndose así temperaturas y presiones extremadamente altas. Se estima que la temperatura debe ser de unos 5000°C y la presión es de aproximadamente 2000 atmosferas (Capote & de Castro, 2007). El intercambio de gas entre el líquido y las burbujas de cavitación es proporcional al área de transferencia (área de burbuja). Por una parte durante el ciclo de descompresión, el flujo de gas se produce desde el líquido hacia la burbuja, provocando que ésta se expanda. Por otra parte, durante el ciclo de compresión, el flujo de gas ocurre en dirección opuesta y por lo tanto la burbuja se contrae, disminuyendo su superficie (Figura 1.7). La cantidad de gas perdido siempre es inferior al ganado, por lo que el tamaño aumenta cada ciclo.

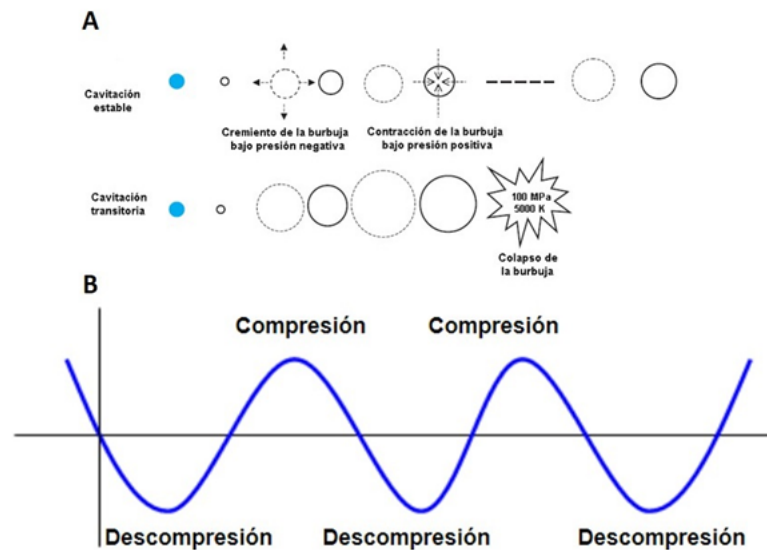


Figura 1.7. A) Crecimiento e implosión de las burbujas de cavitación en un medio líquido durante la aplicación de ondas ultrasónicas de alta intensidad; B) Ciclos de compresión y descompresión de la burbuja

Existen dos tipos de cavitación acústica: estable y transitoria. Durante la cavitación estable las burbujas que se forman oscilan en un radio promedio en un campo de sonido durante muchos ciclos acústicos. La tasa de crecimiento de estas burbujas durante la rarefacción debe ser equivalente a su tasa de contracción durante la fase de compresión, es decir, no se lleva a cabo la difusión rectificadora o una transferencia

desigual de masa a la burbuja durante el ciclo de onda acústica. La difusión rectificadora se refiere a cuando la burbuja de cavitación crece más durante la expansión que el encogimiento durante la contracción debido a la difusión de los gases y el vapor de la fase líquida hacia la burbuja. La cavitación transitoria ocurre solo en pocos ciclos acústicos, en ella la burbuja crece mucho más que su tamaño inicial, hasta que implosiona creando temperaturas y presiones extremas (Thompson & Doraiswamy, 1999).

1.6.4. Aplicación del ultrasonido en procesos de transferencia de calor

El uso de ultrasonido en la industria alimentaria puede ayudar a reducir significativamente la tasa de diversos procesos. Al aplicar ultrasonido en los procesos éstos se pueden completar en segundos o minutos con alta reproducibilidad, reduciendo así el costo de procesamiento, simplificando la manipulación y el procesamiento. El ultrasonido involucra los fenómenos físicos y químicos que actúan de forma distinta en comparación con los aplicados con en las técnicas convencionales de extracción, procesamiento o conservación. Los objetivos principales de la aplicación de ultrasonido son reducir el tiempo de procesamiento, ahorrar energía y mejorar la vida útil y la calidad de los productos alimenticios. Las aplicaciones de ultrasonido se basan en tres métodos diferentes, a) aplicación directa al producto, b) acoplamiento con el dispositivo, c) sumergimiento en un baño de ultrasonido. Existe un gran número de aplicaciones de ultrasonido de alta intensidad en el procesamiento de alimentos (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Aplicación del ultrasonido en procesos alimentarios

Aplicación	Método convencional	Principio ultrasónico	Ventajas	Productos	Referencias
Cocción	Estufa Freído Baño de agua	Transferencia de calor uniforme	Reducción del tiempo, mejora de la transferencia de calor y calidad	Carne y vegetales	McClements (1995); Park & Roh (2001)
Congelación/ Cristalización	Congelador Congelación por inmersión, por contacto	Transferencia de calor uniforme	Reducción del tiempo, cristales pequeños, mejora de la difusión, rápida	Carne, vegetales, frutas y productos lácteos	De Castro & Priego-Capote (2007); Mortazavi & Tabatabaie (2008)
Secado	Atomización Flujo de gas caliente Congelación Pulverización	Transferencia de calor uniforme	Reducción del tiempo, mejora en la calidad organoléptica, mejora en la transferencia de calor	Productos deshidratados (frutas, vegetales, etc.)	Gallego-Juárez (1998); Jambrak <i>et al.</i> (2007)
Marinado	Salmuera	Incremento de la transferencia de masa	Reducción del tiempo, mejora en la propiedades organolépticas, estabilidad del producto	Vegetales, carne, pescado, queso	Cárcel <i>et al.</i> (2007); Sánchez <i>et al.</i> (1999)
Desgasificación	Tratamiento mecánico	Fenómeno de compresión-rarefacción	Reducción del tiempo. mejorar higiene	Chocolates, productos fermentados y jugos	Matsuura <i>et al.</i> (1994); Tervo <i>et al.</i> (2006)
Emulsificación	Tratamiento mecánico	Fenómeno de cavitación	Reducción de tiempo, estabilidad de la emulsión	Emulsiones (Cátsup, mayonesa, etc.)	Povey & Mason 1998
Cortado	Cuchillo	Fenómeno de cavitación	Reducción del tiempo, reducción de pérdida de producto	Productos frágiles (pasteles, queso, etc)	Chemat <i>et al.</i> (2011)

Son varias las aplicaciones del ultrasonido donde está implícito el fenómeno de transferencia de calor como es el caso del secado de alimentos, donde se lleva a cabo una eliminación de humedad del producto, en el cual se utiliza corrientes de aire caliente; sin embargo este método de secado lleva un tiempo relativamente largo y además las altas temperaturas pueden dañar al producto, lo que puede generar cambios de color, sabor y valor nutricional del producto rehidratado. El secado asistido con ultrasonido estimula la deshidratación evitando las desventajas mencionadas. La difusión en un límite entre un sólido suspendido y un líquido se acelera en un campo ultrasónico haciendo que la transferencia calor aumente en aproximadamente de 30 a 60 %. El secado con ultrasonido ya ha sido estudiado en algunos alimentos como leche en polvo, verduras y cristales de azúcar donde se ha observado un mecanismo hidrodinámico de transferencia de masa, que aumenta significativamente las pérdidas de agua y la ganancia de soluto (Chemat *et al.*, 2011).

1.6.4.1. Aplicación del ultrasonido en procesos de congelación

Existen varios trabajos donde se aplica el ultrasonido en procesos de congelación de alimentos, donde se estudia el inicio de la nucleación, la velocidad de congelación y como se ve afectada la calidad de los alimentos al aplicar el ultrasonido. Cheng *et al.* (2014) estudiaron la influencia del ultrasonido de alta intensidad en la nucleación durante la congelación por inmersión asistida con ultrasonido. Los resultados mostraron que la irradiación con ultrasonido fue capaz de inducir la nucleación. Ellos aplicaron el ultrasonido en diferentes temperaturas de la muestra y diferentes tiempos de ultrasonido, donde la temperatura de irradiación con ultrasonido a 0.5°C durante 7 segundos de duración con una intensidad de 0.26W/cm², fue una condición óptima de aplicación de ultrasonido para la inducción de la nucleación en las muestras de rábano. Cheng *et al.* (2014) estudiaron los efectos de la irradiación con UAI en los parámetros de congelación con inmersión asistida con ultrasonido en fresas, los resultados mostraron que la aplicación del ultrasonido a diferentes temperaturas fue capaz de inducir la nucleación en un menor grado de sobreenfriamiento en comparación con las muestras control, cuando se aplicó el ultrasonido el tiempo de congelación característico (CFT) fue significativamente más corto que el de las muestras control, también se observó que a una intensidad alta de ultrasonido se acortaba efectivamente el CFT. Ellos concluyeron que la combina-

ción de la temperatura y la intensidad ultrasónica puede ser eficaz para controlar los procesos de nucleación y congelación en frutas. Xin *et al.* (2014) aplicaron el UAI durante el proceso de congelación en muestras de brócoli, evaluaron el tiempo congelación y propiedades fisicoquímicas de las muestras de brócoli (calcio de la pared celular en relación al calcio total, color, textura, pérdida por goteo y contenido de ácido L-ascórbico). Observaron que la aplicación de UAI disminuyó el tiempo de congelación y la pérdida del contenido de calcio en la pared celular. Compararon los valores de L-ascórbico en muestras control hallando que este se conserva mejor en muestras irradiadas y además la pérdida por goteo se minimizó significativamente aplicando UAI. Comandini *et al.* (2013) aplicaron UAI en muestras de papa durante el proceso de congelación para estudiar el efecto que esta tenía en el proceso. Los parámetros evaluados durante la congelación fueron la temperatura y el tiempo de nucleación, el sobre-enfriamiento, la temperatura de congelación inicial, la fase de transición y la duración de la congelación global. Hallaron que el ultrasonido era capaz de inducir la nucleación en el centro de los cubos de papa, interrumpiendo el proceso de sobreenfriamiento, también bajo ciertas condiciones operativas, el tiempo de congelación de las muestras de papa asistidos con ultrasonido se reduce significativamente con respecto a las muestras no irradiadas. La posibilidad de reducir el tiempo y los costos de congelación, así como la influencia del ultrasonido en la calidad, la estabilidad y las propiedades sensoriales de los alimentos congelados tiene una importancia crucial para la industria alimentaria.

II. Objetivo

Objetivo general

Evaluar el proceso de congelación por inmersión asistido con ultrasonido de alta intensidad mediante la determinación del coeficiente de transferencia de calor convectivo (h) a partir de una solución analítica.

Objetivos específicos

- Encontrar la posición en el equipo ultrasónico que presente un menor tiempo de enfriamiento y calcular su potencia ultrasónica.
- Determinar el coeficiente de transferencia de calor convectivo (h) en muestras modelo (esfera y cubo de cobre) mediante el desarrollo de una solución analítica.
- Evaluar el efecto del proceso de congelación asistido con ultrasonido sobre las propiedades térmicas y fisicoquímicas de una matriz alimenticia.

III. Hipótesis

El Cálculo de h a través de la solución analítica evalúa de forma confiable el proceso de congelación asistida con UAI.

IV. Metodología

4.1. Plan de trabajo

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación se hizo un plan de trabajo (Figura 4.1), el cual está dividido en cuatro etapas. En la primera etapa, se estudió la distribución de la actividad cavitacional, con el fin de encontrar la posición en donde la transferencia de calor se diera de manera rápida. Para ello se utilizaron muestras de cobre con diferentes geometrías a una temperatura de enfriamiento, esto con el fin de estudiar el fenómeno de transporte de energía de manera ideal y sin interferencias por la naturaleza del mismo. La experimental se realizó a diferentes posiciones y profundidades dentro de un baño de ultrasonido con efecto de la cavitación (convección forzada) y sin efecto de la cavitación (convección no forzada). Por otro lado, se determinó la potencia real ultrasónica por medio de una calorimetría. Para la segunda etapa, se evaluaron las cinéticas de enfriamiento y durante esta etapa se registró el tiempo y la temperatura de las muestras con diferentes geometrías de cobre hasta llegar a la temperatura del medio de inmersión con y sin aplicación de ultrasonido. La posición de las geometrías estuvo en función del experimento de la primera etapa. Para la determinación de la transferencia de calor convectivo (h) se hizo una solución analítica, la cual permita la descripción del fenómeno en convección forzada (con UAI) y convección no forzada (sin UAI) considerando la naturaleza de la muestra de estudio. Esto se hizo mediante la consideración del cálculo de números adimensionales y tomando en cuenta las propiedades térmicas de la muestra. También se evaluó el efecto de la irradiación ultrasónica en el proceso de enfriamiento de un alimento con el fin de conocer la interferencia de la naturaleza del alimento. Finalmente se determinaron las propiedades fisicoquímicas del alimento con el fin de observar el efecto de la irradiación del ultrasonido en las muestras de papa durante el proceso de congelación.

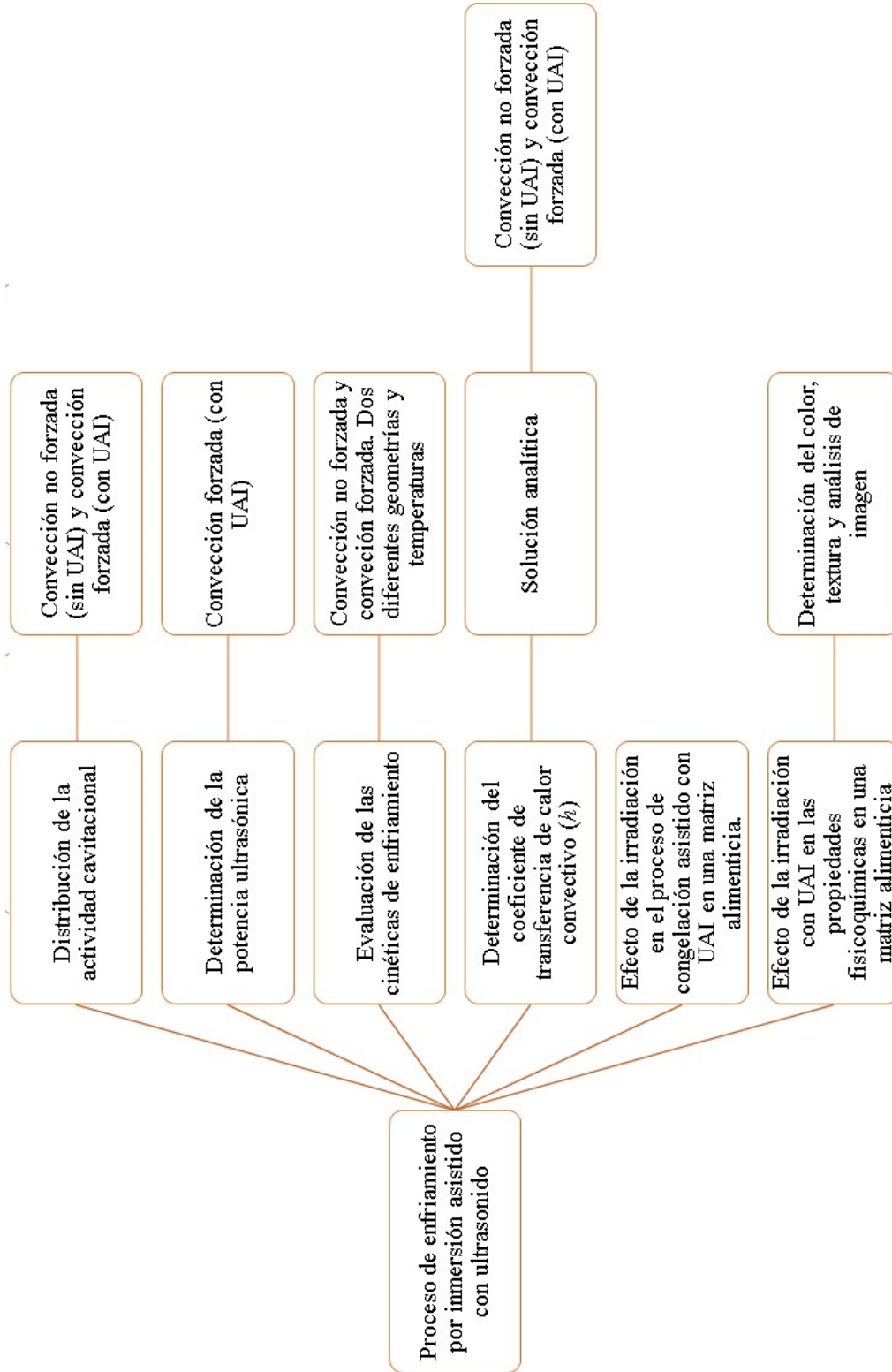


Figura 4.1. Plan de trabajo

4.2. Distribución de la actividad cavitacional

Con el fin de encontrar dentro del espacio del baño ultrasónico el lugar en donde menor tiempo de enfriamiento se alcanza, así como mayores valores de h , se obtuvieron las curvas de enfriamiento para una esfera de cobre, utilizando el baño ultrasónico (Elmasonic P 70 H) el cual trabajó a 37KHz de frecuencia y a su potencia máxima de 800W. El baño ultrasónico es un tanque rectangular con dimensiones interiores de 505/137/100mm de longitud, ancho y profundidad, respectivamente., Cuenta con cuatro transductores piezoeléctricos en el fondo, dispuestos horizontalmente (Figura 4.2). Como solución de inmersión se utilizó etilenglicol al 50 % (v/v) el cual tiene un punto de congelación de -37°C , sus propiedades termofísicas se describen en la Tabla 4.1. Para mantener la solución a la temperatura de 0°C se usó un baño recirculador (AD07R-20-AA1B. PolySciencie. Estado Unidos). La esfera de cobre de 20mm de diámetro se colocó en dos diferentes profundidades (25 y 55mm), así como en tres diferentes posiciones dentro del baño (Figura 4.3). Para colocar la esfera de cobre dentro de la solución en el baño ultrasónico se utilizó un porta muestras de acero inoxidable, a la esfera de cobre se le introdujo un termopar tipo K en su centro geométrico, el cual registró el cambio de temperatura cada segundo en un sistema de adquisición de datos. La temperatura inicial de la esfera de cobre se ajustó a 20°C y luego se sumergió a la solución de etilenglicol-agua. La irradiación con ultrasonido se inició un poco antes de introducir la esfera en el baño, esto con el fin de garantizar que todo el proceso de enfriamiento estuviera acompañado del ultrasonido. Los experimentos se realizaron en presencia y ausencia de la aplicación de ultrasonido de alta intensidad y se realizaron por triplicado.

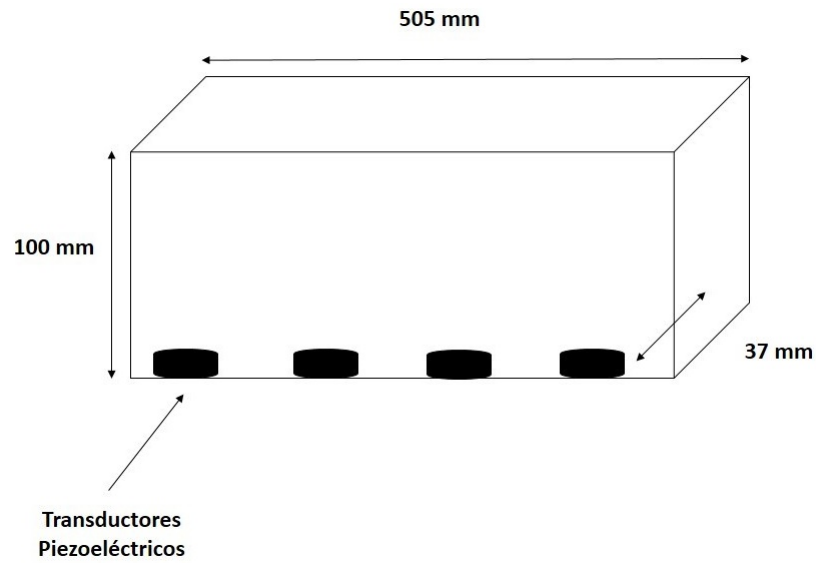


Figura 4.2. Esquema de las dimensiones interiores del baño de ultrasonido

Tabla 4.1. Propiedades termo físicas del etilenglicol-agua

Propiedad	Temperatura (°C)	
	0	-5
Densidad(ρ) (Kg/m ³)	1.050	1055
Capacidad calorífica (C_p) (J/Kg k)	3396.29	3411.61
Viscosidad (μ) (Pa S)	0.0083	0.01
Conductividad térmica (k) (W/m K)	0.4145	0.4137

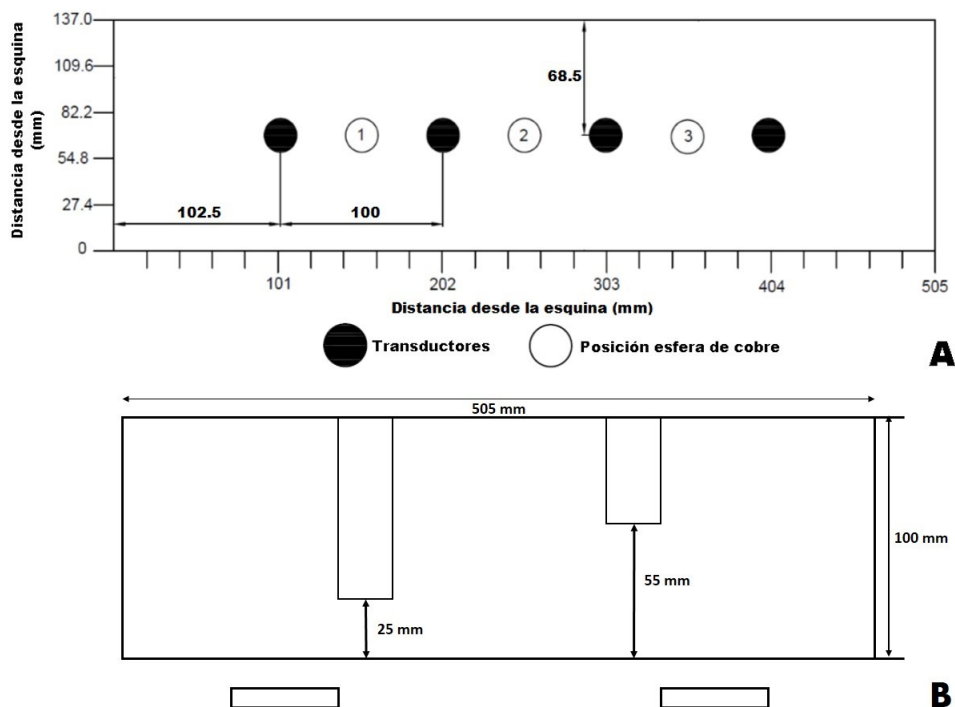


Figura 4.3. Esquema de la posición (A) y profundidad (B) del termopar en el baño de ultrasonido

4.3. Determinación de la potencia ultrasónica

Para la determinación de la potencia ultrasónica, se utilizó un medio de inmersión de una solución de etilenglicol-agua al 50 % v/v. Se determinó el incremento de la temperatura del medio de inmersión que se llevó a cabo durante la aplicación del ultrasonido (Cheng *et al.*, 2014). Se registró el cambio de temperatura del medio de inmersión cada segundo durante la aplicación del ultrasonido por 180 segundos. La temperatura se registró mediante una sonda termopar tipo K conectada a un equipo de adquisición de datos. La posición donde se realizó la calorimetría dentro del baño ultrasónico estuvo en función del experimento anterior, el cual corresponde a la posición 2 con una profundidad de 25 mm. La calorimetría se realizó por triplicado. La potencia ultrasónica (W) se calculó de acuerdo a la (Ecuación 4.1) a partir de la pendiente de la curva de temperatura-tiempo obtenida experimentalmente, donde

se determinó el calor absorbido por el medio de inmersión.

$$P = MCp \frac{dT}{dt} \tag{4.1}$$

Donde M (Kg) es la masa del medio de inmersión, Cp (J/Kg°C) es su calor específico y dT/dt es el incremento de la temperatura que se experimenta en el medio de inmersión por acción del ultrasonido. Con el dato de la potencia ultrasónica se pudo obtener también la intensidad (W/cm^2), dividiendo la potencia sobre el área de la sección transversal del fondo del baño ultrasónico (Ecuación 4.2).

$$I = \frac{P}{A} \tag{4.2}$$

4.4. Solución analítica y determinación del coeficiente de transferencia de calor convectivo

Como forma de evaluación de la transferencia de calor convectivo en el proceso de enfriamiento asistido con ultrasonido, se calculó el coeficiente de transferencia de calor convectivo (h). Para poder calcular h fue necesario desarrollar una solución analítica que permitiese la solución de la ecuación de transferencia de calor para calcular el tiempo de enfriamiento en estado no estacionario en geometrías de esfera y cubo (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Ecuación diferencial de transferencia de calor en coordenadas rectangulares y esféricas.

Coordenada	Ecuación diferencial de transferencia de calor
	$\frac{\partial}{\partial t} (CpT) = \nabla [k \nabla (T)]$
Rectangular	$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)$
Esferica	$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \text{sen} \theta} \left(\text{sen} \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \text{sen}^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{\partial T}{\partial \varphi} \right)$

En las ecuaciones, las propiedades térmicas y físicas (conductividad térmica (k), densidad (ρ) y calores específicos (Cp)) del alimento son independientes de la temperatura teniendo implicación en la difusividad térmica (Ecuación 4.3).

$$\alpha = \frac{k}{\rho Cp} \tag{4.3}$$

La solución analítica para el cálculo de h se desarrolló por medio de separación de variables y por el método de transformada de Laplace. La manera en cómo se realizó la aplicación de dicha solución analítica forma parte de los resultados obtenidos en el presente trabajo, por lo que se describe a detalle en el apartado correspondiente a Resultados (5.1) (Erdogdu, 2008), se determinó el coeficiente de transferencia de calor convectivo (h) por medio de las curvas de enfriamiento en figuras a base de cobre con las siguientes propiedades termofísicas: $k = 400\text{W/m K}$, $C_p = 385\text{J/Kg K}$ y $\rho = 8660\text{Kg/m}^3$. Las figuras geométricas usadas fueron esfera de 20mm de diámetro y cubo de 20 mm de lado. Las temperaturas del medio de inmersión fueron 0 y -5°C . A las geometrías se les introdujo un termopar tipo K en su centro geométrico y posteriormente se colocaron en un porta muestras de acero inoxidable para que la figura geométrica no se moviera. El porta muestras con la figura se introdujo en el baño de ultrasonido con el medio de inmersión (etilenglicol-agua 50 %) en la posición donde mejor se llevó a cabo la transferencia de calor convectivo determinado en la primera parte del estudio (Posición 2 y profundidad de 25 mm). La temperatura a la que se introdujo la figura fue la del medio ambiente ($24\text{-}25^\circ\text{C}$). La temperatura de la figura dentro del baño en el medio de inmersión se registró cada segundo. Los experimentos se realizaron en presencia y ausencia del UAI, y se llevó a cabo por triplicado.

4.5. Efecto de la irradiación en el proceso de congelación asistido con UAI en una matriz alimenticia

Para realizar las curvas de congelación en las muestras de papa se utilizó un baño, el cual se llenó con la solución de etilenglicol al 50 % (v/v), la temperatura de la solución se colocó de manera que las muestras alcanzaran una temperatura promedio de -8°C . Se utilizaron cubos de papa de 20mm de lado, a los cuales se les introdujo un termopar tipo K, que estaba conectado a un equipo de adquisición de datos y posteriormente esto se colocó en un porta muestras de acero inoxidable. Inmediatamente se sumergieron en la solución de congelación en la ubicación establecida dentro del baño (posición 2 y 25mm de profundidad). El cambio de la temperatura

con respecto al tiempo lo registro el equipo, el cual estaba conectado al termopar que estaba dentro de la papa. Los experimentos se realizaron por triplicado. Una vez que se obtuvieron las curvas de congelación (tiempo vs temperatura) se eligió una temperatura de la muestra para que en ese punto se aplicara el ultrasonido. El ultrasonido se aplicó una vez que la muestra alcanzó los 0.5°C, con dos diferentes duraciones de aplicación (7 y 10s). El proceso de congelación se controló con los termopares tipo K y se obtuvieron las curvas de congelación. Las temperaturas de nucleación, el tiempo del inicio de nucleación, el tiempo de fase de transición y el tiempo de congelación se obtuvieron a partir de las curvas de congelación. Los experimentos se realizaron por triplicado.

4.5.1. Evaluación de las proepiedades fisicoquímicas de la matriz alimenticia

4.5.1.1. Preparación de la materia prima

Se utilizaron como materia prima papas (*Solanum tuberosum*), las cuales fueron adquiridas en un mercado local de la ciudad de Puebla. Las papas se lavaron y secaron, para posteriormente cortarlas en cubos de 20x20x20 mm. Los cubos de papa se escaldaron durante 5 minutos a una temperatura de 85°C, después del escaldado se almacenaron, hasta su uso. Para evaluar los parámetros de firmeza y color en las muestras de papa fresca y papas con los tratamientos de congelación, se llevaron a cabo las pruebas de textura, colorimetría y análisis de imagen.

4.5.1.2. Color

El color se determinó por medio del colorímetro Hunter Lab L*, a*, b* (45/0. D65, 10°, Color Flex EZ, USA), el método utilizado para hacer las mediciones fue el descrito por (Savadkoohi *et al.*, 2014), en el cual se midió en la superficie de la muestra la luminosidad L*, las coordenadas de color a* (± rojo-verde) y b* (± amarillo- azul). También se calculó el ángulo de tono (°h) (Ecuación 4.4) así como, el índice de saturación o cromo (°C) (Ecuación 4.5) que describe el tono y el brillo o la intensidad del color.

$$h^{\circ} = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (4.4)$$

$$C_* = (a_*^2 + b_*^2)^{0.5} \quad (4.5)$$

Se examinaron las relaciones de las diferencias reales (ΔE) en los valores de color con las diferencias percibidas visualmente, utilizando la Ecuación 4.6

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L_*^2 + \Delta a_*^2 + \Delta b_*^2} \quad (4.6)$$

4.5.1.3. Textura

Se realizó un análisis de textura para las muestras de papa, el análisis de textura se hizo en papas frescas y papas descongeladas después de los tratamientos de congelación convencional y asistida con UAI. La prueba se realizó con un analizador de textura (TA.XT. plus Stable Micro Systems, Surrey, England). El análisis fue realizado utilizando los parámetros establecidos por el mismo equipo, dentro del programa denominado "Shearing force of potato after different cooking times using a knife blade" donde se midió la fuerza en compresión de las muestras. Las muestras fueron colocadas en la base del texturómetro, para ser comprimidas por una sonda tipo Warner Bratzler Blade "V" a una velocidad constante de 2mm/s, la velocidad de pre-ensayo fue de 2mm/s, la velocidad de post-ensayo fue de 10mm/s y el intervalo de tiempo del ciclo de compresión fue de 5 segundos. Las curvas de fuerza se obtuvieron en cada muestra, según la cual se cuantificó la fuerza máxima requerida para comprimir la muestra. Se realizaron triplicados por cada experimental.

4.5.1.4. Análisis de imagen

Se observó la estructura de las muestras de papa en la corteza de la muestra (parte exterior) y de su tejido vascular (parte interior) por medio de un microscopio digital (DUS.42 S02 USB Digital Microscope 500X 8 led, Honyu, China). Para ello se realizaron los análisis de imagen de las muestras congeladas y descongeladas con y sin aplicación de UAI. El enfoque de la cámara se fijó en el centro geométrico de la muestra de papa.

V.Resultados

5.1. Desarrollo de la solución analítica

El proceso de enfriamiento de los alimentos se puede describir por la transferencia de calor por conducción y convección en estado no estacionario. La ecuación diferencial de transferencia de calor depende de la forma geométrica del alimento a enfriar. En este trabajo la solución de la ecuación diferencial de transferencia de calor (Ecuación 5.1) se desarrolló mediante una técnica analítica la cual se obtiene utilizando algunas técnicas de análisis, como la transformada de Laplace y el método de separación de variables

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) = \nabla \cdot [k \nabla (T)] \quad (5.1)$$

La separación de variables es usada ampliamente en la solución de problemas de transferencia de calor por conducción donde los sistemas de ecuación homogéneos son fáciles de manejar. El método se basa en desarrollar una función en términos de series de Fourier, donde la variable dependiente es la Temperatura (T) asumiendo que ésta puede ser el producto de las variables independientes (localización, x y tiempo, t). Este método se aplica cuando la ecuación gobernante y las ecuaciones diferenciales representen los límites, además las condiciones iniciales deben ser homogéneas y lineales. Si la formulación contiene varios términos no homogéneos, el problema se puede dividir en un número igual de problemas más sencillos, comprendido cada uno como un sólo término no homogéneo y después combinando las soluciones por superposición. Las ecuaciones para solucionar la ecuación de transferencia de calor por el método de separación de variables para las geometrías de pared plana y esfera se muestran en la Tabla 5.1 .

Tabla 5.1. Soluciones para la conducción transitoria unidimensional en una pared plana de espesor 2L y una esfera de radio r0, sujetos a convección desde todas las superficies.

Geometría	Solución	Las λ_n son raíces de
Pared plana	$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4\text{sen}\lambda_n}{2\lambda_n + \text{sen}(2\lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 \tau} \cos(\lambda_n x/L)$	$\lambda_n \tan \lambda_n = Bi$
Esfera	$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(\text{sen}\lambda_n - \lambda_n \cos \lambda_n)}{2\lambda_n - \text{sen}(2\lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 \tau} \frac{\text{sen}(\lambda_n x/L)}{\lambda_n x/L}$	$1 - \lambda_n \cot \lambda_n = Bi$

donde $\vartheta=(T-T_{\infty})/(T_0-T_{\infty})$ es la temperatura adimensional, $Bi=hL/k$ o hr_0/k es el número de Biot, $F_o= \tau=\alpha t/L^2$ O $\alpha t/r_0^2$ es el número de Fourier (tiempo adimensional), x/L es la distancia adimensional desde el centro y J_0 y J_1 son las funciones de Bessel. Para poder aplicar la solución analítica, fue necesario consultar diferentes fuentes bibliográficas que permitieran definir las variables necesarias para su ejecución (Baehr & Stephan, n.d.; Erdogan, 2008; Gengel, 2007)

5.2. Distribución de la actividad cavitacional

Para encontrar el mejor lugar donde se lleva a cabo la transferencia de calor dentro del baño ultrasónico se realizaron curvas de enfriamiento con aplicación de las ondas acústicas. Las Figuras 5.1A, D y G muestran las curvas obtenidas experimentalmente y las calculadas a partir de la solución analítica en la posición 1, 2 y 3 respectivamente, así como en las dos diferentes profundidades de 25 y 55 mm.

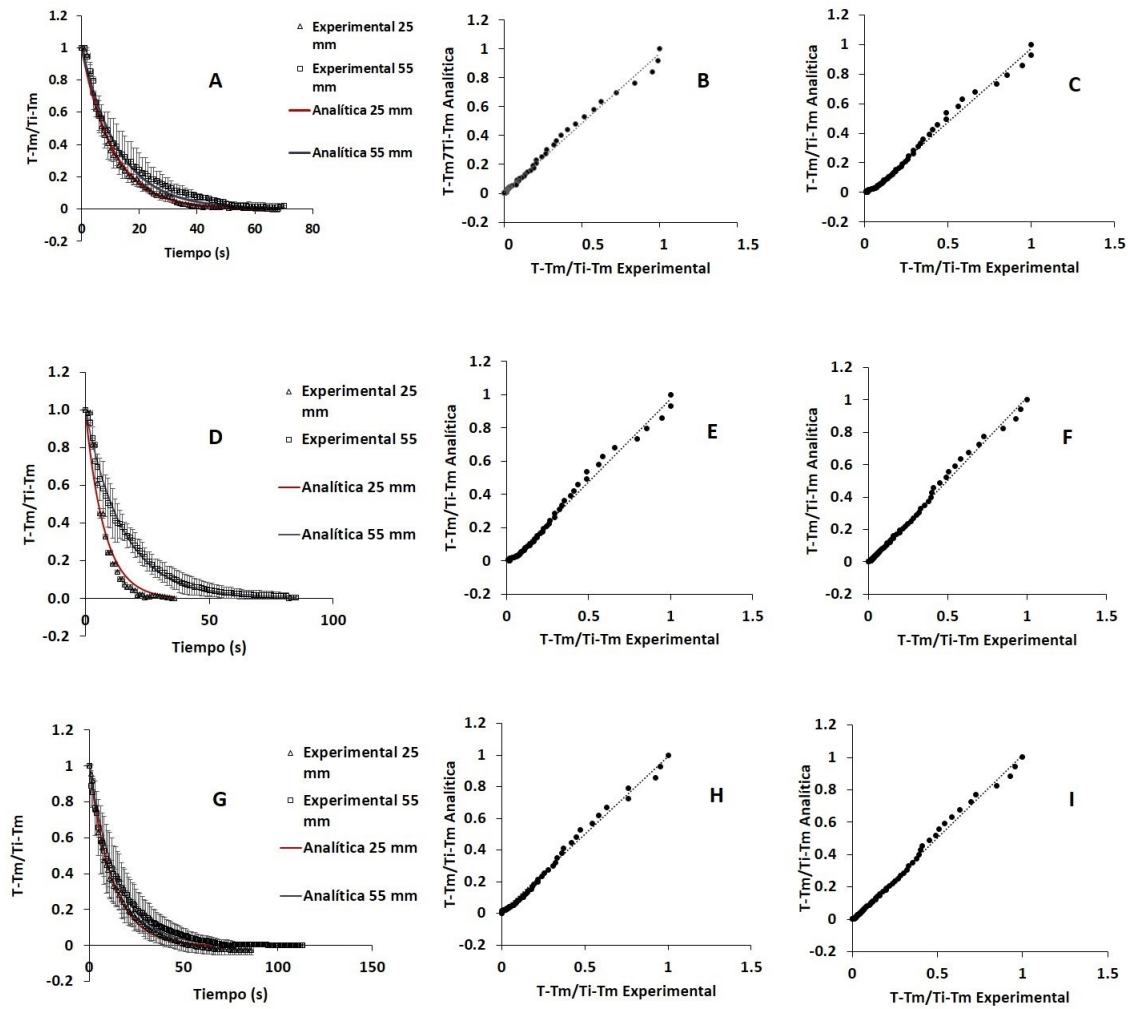


Figura 5.1. Cinéticas de enfriamiento a tres diferentes posiciones [1 (A), 2 (D) y 3 (G)] y dos profundidades (25 y 55mm) con solución analítica y datos experimentales en una esfera de cobre. Ajuste entre los datos experimentales y los calculados a partir de la solución analítica en las posiciones 1 (B y C), 2 (E y F) y 3 (H e I) y en las profundidades de 25 mm (B, E y H) y 55mm (C, F e I). Media \pm desviación estándar ($n = 3$).

En los resultados obtenidos en el presente trabajo se mostraron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las profundidades. La posición 2 a una profundidad de 25mm mostró el menor tiempo de enfriamiento (36s), seguido de la posición 1 (68s) y finalmente la posición 3 (86s) para la misma profundidad. La posición 2 tiene a su alrededor dos transductores posicionados a la misma distancia produciendo un efecto de cavitación sinérgica, creando condiciones propicias para una mayor

transferencia de energía. De manera general, la profundidad de 25mm mostró los menores tiempos de enfriamiento en comparación con la profundidad de 55 mm. Con el fin de evaluar el comportamiento de la transferencia de energía en función de la distribución de la cavitación ultrasónica, se calculó el valor de h mediante el uso de la solución analítica mencionada en el apartado anterior (7.1) del presente trabajo, para cuantificar la energía dentro del baño ultrasónico, por lo tanto, en la Tabla 5.2 se muestran los valores de h obtenidos, donde los mayores valores de h fueron para la profundidad de 25mm, siendo el mayor valor obtenido el de la posición 2 ($1497.70 \pm 32.88\text{W/m}^2\text{°C}$), coincidiendo con la que obtuvo el menor tiempo de enfriamiento. El menor valor de h fue obtenido en la posición 2 a la profundidad de 55mm ($752.29 \pm 21.15\text{W/m}^2\text{°C}$). El aumento de la distancia entre la esfera de cobre y los transductores reduce la actividad cavitacional, atenuándose la señal debido a la distancia.

Tabla 5.2. Valores del coeficiente de transferencia de calor h y la correlación R^2 en distintas posiciones y profundidades dentro del baño ultrasónico durante el enfriamiento de una esfera de cobre a 0 °C .

Posición	Profundidad	h ($\text{W/m}^2\text{°C}$)	R^2
1	25	1051.33 ± 29.34^{aB}	0.98
	55	898.54 ± 52.20^{aA}	0.90
2	25	1497.70 ± 32.88^{aB}	0.95
	55	752.29 ± 21.15^{aA}	0.96
3	25	928.97 ± 28.88^{aB}	0.95
	55	761.38 ± 30.47^{aA}	0.90

Media \pm desviación estándar ($n = 3$). Letras minúsculas para diferentes posiciones muestran diferencias significativas ($p < 0.05$). Letras mayúsculas para diferentes profundidades muestran diferencias significativas ($p < 0.05$)

Además, se realizó la correlación de la curva de enfriamiento experimental con la curva analítica (Figura 5.1 B, C, E, F, H e I) para obtener el ajuste, mostrando relaciones R^2 con un rango de 0.90 a 0.98, por lo cual la solución analítica fue confiable para predecir el comportamiento del enfriamiento.

Una vez seleccionado el lugar donde se obtuvo el valor mayor de h así como el menor tiempo de enfriamiento dentro del baño de ultrasonido, se verificó en este

mismo punto la transferencia de energía, realizando la curva de enfriamiento (Figura 5.2) sin aplicación de UAI, con el fin de tener un referencia de control. En la Figura 5.1A se muestra la curva de enfriamiento con los datos experimentales y la solución analítica a la posición 2 y profundidad de 25 mm, con y sin la aplicación de UAI. El tiempo de enfriamiento que se observa en esta curva es de 206 s para la muestra control mientras que para la muestra tratada con UAI se alcanzó un tiempo de 36 s, teniendo una diferencia significativa ($p < 0.05$) entre ellas. El valor de h calculado en la curva control fue de $406.01 \text{ W/m}^2\text{°C}$, un valor menor en comparación con los valores obtenidos durante los experimentos asistidos con UAI. Por otro lado, en la Figura 5.2 B se observa el ajuste de la solución analítica con los valores experimentales, obteniendo una R^2 de 0.93, también siendo el valor más bajo a la profundidad de 25 mm, en comparación con los valores de las curvas de 25 mm con aplicación de UAI.

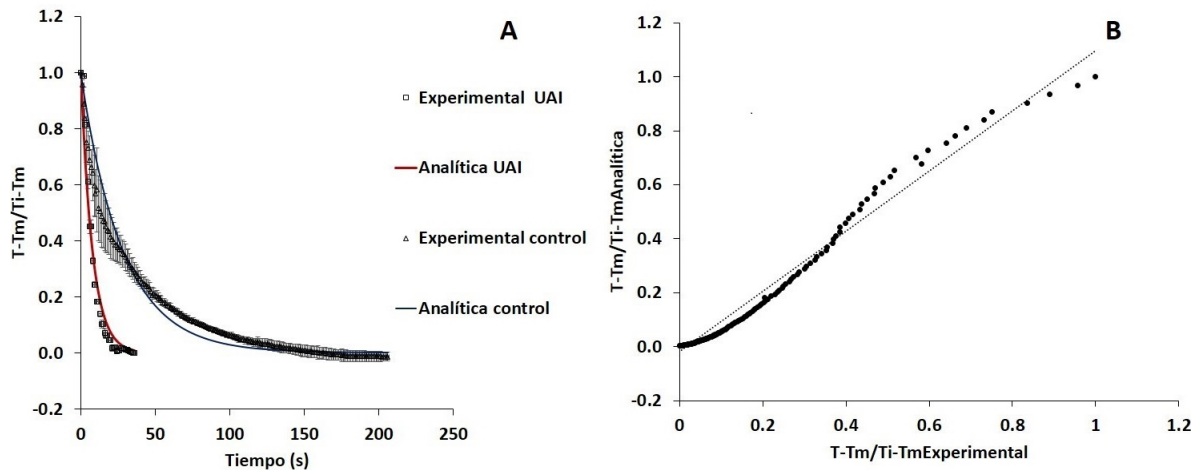


Figura 5.2. A) Cinéticas de enfriamiento con datos experimentales y los calculados a partir de la solución analítica en la posición 2 y profundidad de 25 mm dentro del baño, en una esfera de cobre. Media \pm desviación estándar ($n = 3$). B) Ajuste entre los datos experimentales y los calculados a partir de la solución analítica en la curva control.

Con lo discutido anteriormente se concluye que la posición donde se coloca la muestra dentro del baño repercute en la transferencia de calor en la muestra una vez que se comienza a irradiar la onda ultrasónica, asimismo, la profundidad afecta aún más a la transferencia de calor, pues al colocar la muestra más cerca de los transductores, la velocidad de enfriamiento aumenta, disminuyendo los tiempos,

además se aumentan los valores del coeficiente de transferencia de calor convectivo (h), La aplicación de ultrasonido en muestras de cobre durante el proceso de enfriamiento, disminuye considerable el tiempo del proceso de enfriamiento, es decir para una determinada temperatura a la que debe de llegar la muestra bajo la mismas condiciones, al aplicar el ultrasonido, el tiempo en el que se llega a esa temperatura es menor en comparación con una muestra a la que no se le aplica el ultrasonido, además los valores de h calculados resultan ser menores en las muestras control que en las irradiadas con ultrasonido.

5.3. Determinación de la potencia ultrasonica

Se realizó una calorimetría en la posición 2 y profundidad de 25mm dentro del baño de ultrasonido para conocer la potencia real que se generó. Para obtener la potencia se realizó la curva (Figura 5.3) que se expresó de acuerdo a la Ecuación 5.2, la cual es el logaritmo natural de la relación de temperatura como un número adimensional.

$$\ln \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = -Kt \quad (5.2)$$

Donde T es temperatura ($^{\circ}\text{C}$), T_{∞} es la temperatura infinita ($^{\circ}\text{C}$) y T_0 es la temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$), del medio de inmersión y k es una constante de proporcionalidad. La curva que se obtuvo se dividió en dos partes, parte (a) y (b) (Figura 5.3 A).

En la parte (a) la pendiente de la curva obtenida es atribuida a la energía liberada por el ultrasonido, mientras que en la parte (b) los datos muestran una mayor dispersión que los obtenidos en la parte (a), se puede atribuir esto debido a que después de cierto umbral, la energía liberada por el ultrasonido comienza a dispersarse, debido a que existe un intercambio de calor del medio de inmersión con el ambiente. Para calcular la potencia ultrasónica se utilizó la Ecuación 4.1 sin embargo, esta ecuación no es muy precisa en cuanto a los cambios de temperatura, por ello el cálculo se realizó de acuerdo a la Ecuación 5.3, la cual es capaz de predecir los cambios de temperatura con una precisión alta.

$$P = (T_0 - T_{\infty}) (-k) MCp \quad (5.3)$$

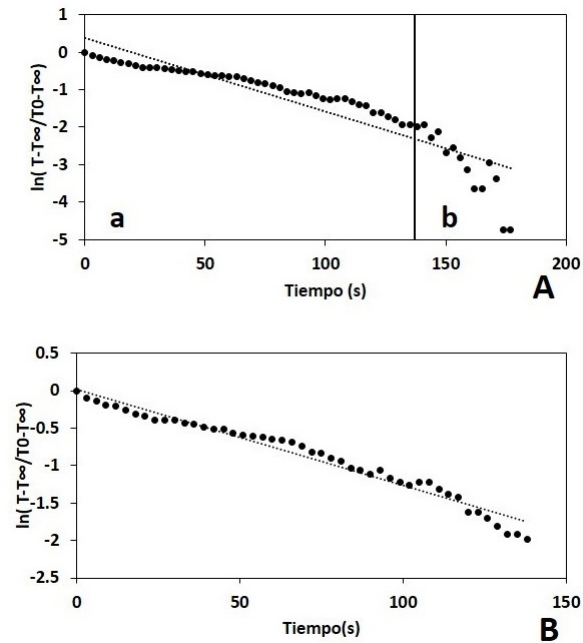


Figura 5.3. Curva de la relación de temperatura de una solución de Etilenglicol 50 % obtenida en la posición 2 y una profundidad de 25 mm dentro del baño de UAI, con interacción con el entorno (A) y sin interacción con el entorno (B). Media \pm desviación estándar (n = 3).

Donde M es la masa del medio (Kg) y C_p es el calor específico del medio (J/Kg°C). Hagenson & Doraiswamy (1998) utilizaron la Ecuación 4.1 para estimar la potencia ultrasónica disipada en un sistema de reacción y se dieron cuenta que era inadecuada pues con ésta se predijo que el 33 % de la potencia suministrada por el transductor se disipó como calor, indicando que el otro 67 % de la potencia se perdió en el proceso de transferencia o por otros medios. La ecuación se modificó tomando en cuenta el calor absorbido por el recipiente de reacción y el disolvente, obteniendo una ecuación similar a la Ecuación 4.1. Los valores de la potencia real ultrasónica (P) fueron de 164.6993W para el caso del gráfico completo mientras que para la parte (a) del gráfico, la potencia fue de 107.5587W es decir, en la parte donde la energía no se disipa aún, considerándose como la energía total entregada por el sistema acústico (cavitacional). En un sistema de ultrasonido ocurren pérdidas por diferentes causas, la primera pérdida de energía ocurre durante la conversión de energía eléctrica a energía mecánica (sonido), otros factores son la producción de calor, la producción de burbujas de cavitación y la sonoluminiscencia. También existen pérdidas por la atenuación de la energía a través del fluido llamado disipación viscosa Thompson & Doraiswamy (1999). Una vez obtenido el valor de la potencia ultrasónica se calculó la intensidad ultrasónica por medio de la Ecuación 4.2, dividiendo el valor de la potencia entre el área de la base del baño de ultrasonido, que es donde se encuentran los transductores, siendo ésta de 0.0505 m², por lo tanto, la intensidad ultrasónica resultante es de 2129.8752W/m².

5.4. Determinación del coeficiente de transferencia de calor convectivo (h)

Se realizaron las curvas de enfriamiento (Figura 5.4) en la posición 2 y profundidad de 25mm dentro del baño en dos diferentes geometrías, cubo y esfera de cobre a dos diferentes temperaturas del medio de enfriamiento (0 y -5°C), con y sin aplicación de UAI. A partir de los datos experimentales se obtuvieron las curvas y se compararon con la solución analítica, el modelo de regresión lineal aplicado, obtuvo un coeficiente de correlación (R^2) de 0.98 y 0.96 para el cubo de cobre con aplicación de UAI a 0 y -5°C respectivamente, mientras que para la esfera, los valores de R^2 fueron de 0.93 y 0.96 En cuanto a los valores de R^2 para las mismas figuras y tem-

peraturas sin aplicación de UAI fueron de 0.92 y 0.97 para el cubo y de 0.95 y 0.85 para la esfera, por lo que los valores experimentales y los calculados están razonablemente ajustados con valores de R^2 mayores a 0.9 con excepción del valor de 0.85 donde no se aplicó el ultrasonido.

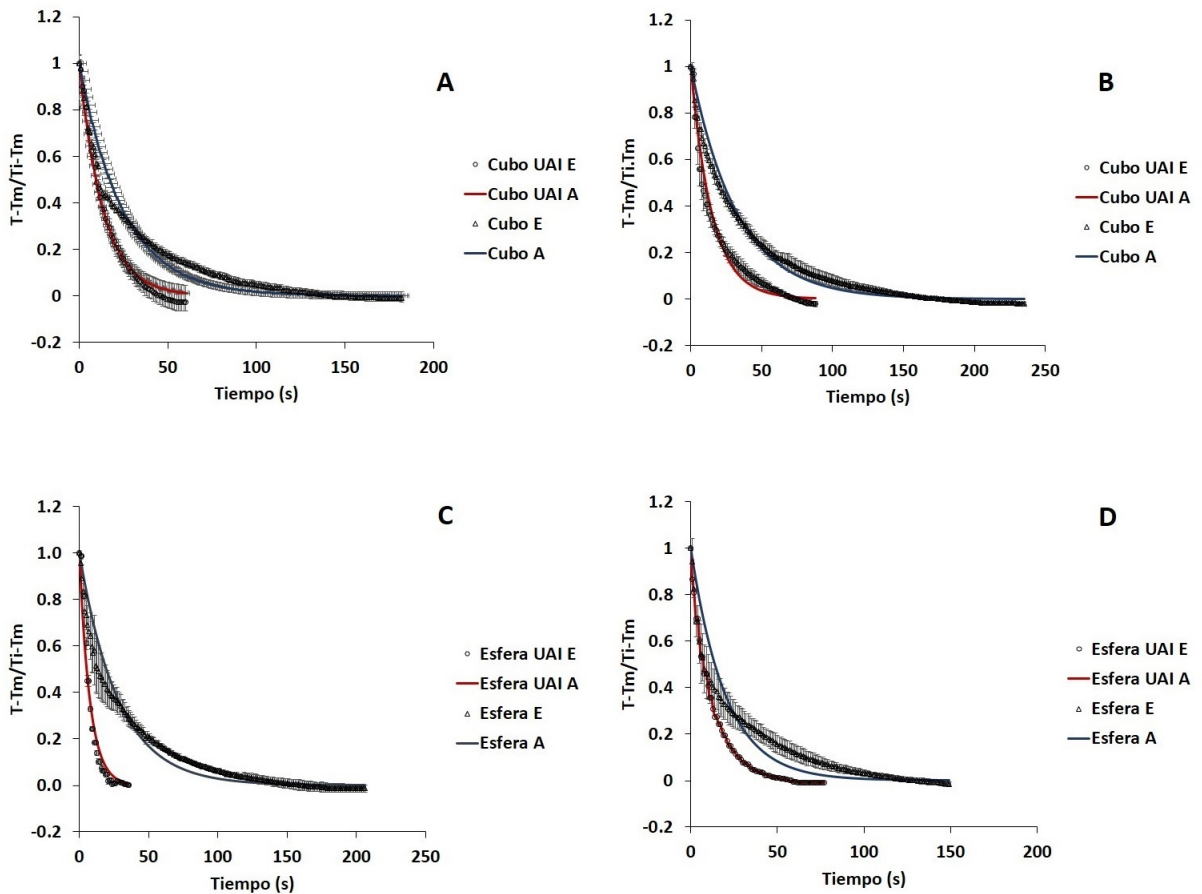


Figura 5.4. Cinéticas de enfriamiento en esfera y cubo de cobre con datos experimentales y los calculados analíticamente, con y sin aplicación de UAI a 0 °C. (A y C) y -5°C (B y D). Media \pm desviación estándar ($n = 3$)

Se calcularon los valores del coeficiente de transferencia de calor (h) para cada caso obteniendo diferencias significativa ($p < 0.05$) entre las figuras y la aplicación de la tecnología acústica (con y sin aplicación de UAI) (Tabla 5.3).

Tabla 5.3. Valores del coeficiente de transferencia de calor h y la correlación R^2 en esfera y cubo a dos diferentes temperaturas con y sin aplicación de UAI.

Geometría	Temperatura (°C)	h (W/m ² °C)		R^2	
		Con UAI	Sin UAI	Con UAI	Sin UAI
Cubo	0	2589.78 ^{bB}	1401.35 ^{bA}	0.98	0.92
	-5	2337.26 ^{bB}	1049.65 ^{bA}	0.96	0.97
Esfera	0	1497.70 ^{aB}	406.01 ^{aA}	0.93	0.95
	-5	1015.19 ^{aB}	570.289 ^{aA}	0.96	0.85

Media \pm desviación estándar (n = 3) Letras minúsculas para diferentes posiciones muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) Letras mayúsculas para diferentes profundidades muestran significativas ($p < 0.05$).

Entre las geometrías, el cubo mostró los valores más altos, y entre la aplicación del ultrasonido, los valores mayores de h fueron con aplicación de UAI. El valor más alto de h que se obtuvo fue de 2589.78 W/m²°C en la geometría de cubo y con aplicación de UAI. En los experimentos donde se aplicó el UAI los valores de h disminuyeron cuando la temperatura fue menor (-5°C) para ambas geometrías, mientras que para los experimentos sin aplicación de UAI el valor de h de la esfera a -5°C fue más alto que el obtenido a la temperatura de 0°C. Para todos los casos se puede observar (Figura 5.4) que las curvas donde se aplicó el UAI redujeron el tiempo en que llegaron a la temperatura determinada en comparación con las curvas donde no se aplicó el UAI (Figura 5.4B y 5.4D). Esto coincide con los resultados de (Kiani *et al.*, 2012) donde realizó un experimento similar con esfera de cobre, en el cual al aplicar UAI durante el proceso de enfriamiento hasta -10°C el tiempo disminuyó considerablemente, también detectaron factores de mejora de hasta 2.5, lo que significa que la tasa de transferencia de calor podría aumentar hasta 2.5 veces mediante el uso de ultrasonido. El ajuste de la solución analítica en la esfera de cobre a -5°C sin aplicación de UAI fue el más bajo como se mencionó anteriormente, pudiéndose observar esto en la Figura 5.4D para las curvas experimental y analítica sin ultrasonido. De ambas geometrías la esfera de cobre obtuvo los menores tiempos de enfriamiento tanto a 0 como a -5°C, sin embargo los valores de h fueron mayores en las geometrías de cubo, debido a que se aumenta el área de transferencia de calor, implicando que el tiempo de enfriamiento en las geometrías de cubo fue mayor que en las geometrías de esfera. De manera general en todas las curvas

de enfriamiento experimentales a temperaturas cercanas a las del medio de inmersión, la velocidad de enfriamiento disminuyó, ya que el efecto del calentamiento de la irradiación con ultrasonido afectó negativamente el enfriamiento, lo que produjo una disminución significativa de la velocidad de enfriamiento y por lo tanto, una reducción en la fuerza impulsora de transferencia de energía.

5.5. Efecto de la irradiación en el proceso de congelación asistido con UAI en una matriz alimenticia

Se realizaron curvas de enfriamiento en una matriz alimentaria con el propósito de observar el comportamiento del proceso de congelación en un alimento con y sin aplicación de UAI. Por lo tanto, se realizaron curvas control (Figura 5.5A) en una muestra de cubo de papa, sin aplicación de UAI, haciéndose las curvas por triplicado. Con esta curva se observó el tiempo completo de congelación, así como el punto donde se iniciaba la nucleación. Considerando lo anterior, para obtener las curvas del proceso de congelación asistido con UAI se observó que existió un punto donde comenzaba a descender la temperatura de manera más lenta (0.5°C), por lo que en ese punto se decidió aplicar el ultrasonido para obtener las curvas irradiadas (Figura 5.5B y 5.5C). Así, el ultrasonido se aplicó cuando la muestra alcanzó los 0.5°C con diferentes tiempos de duración (7 y 10s) con el fin de irradiar la muestra de manera que se incitara al proceso de nucleación, basándose en tiempos de aplicación de irradiación propuestos por referencias bibliográficas (Comandini *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2014).

En la 5.5A se muestra la curva control, para la cual se identificaron y señalaron la temperatura de nucleación, el tiempo de nucleación, el tiempo de la fase de transición y el tiempo de congelación, obteniendo un valor de -0.05°C y 315 segundos para la temperatura y tiempo de nucleación, respectivamente; mientras que el tiempo de la fase de transición comenzó a los 322 segundos y el tiempo de congelación fue de 1183 segundos. Por otra parte, la Figura 5.5B muestra la curva de congelación con aplicación de ultrasonido durante 7 segundos, los valores de los parámetros de congelación antes mencionados fueron, 0.3°C de temperatura de nucleación y 357

s de tiempo de nucleación, los tiempos de fase de transición y tiempo de congelación fueron 364 y 1218 segundos, respectivamente, mientras que la curva de 10 segundos (Figura 5.5C) obtuvo los valores de -0.3°C , 350, 364 y 1267 segundos, respectivamente. En esta misma curva, una vez que se llegó a la temperatura más baja (-0.3°C) dentro de la fase de enfriamiento, se observó que la temperatura volvió a incrementar ligeramente (0.2°C) hasta los 364 segundos, volviendo a aumentar hasta 0.4°C y volver a descender la temperatura para comenzar la fase de congelación. Esto puede implicar que la irradiación con ultrasonido aumentó la tasa de transferencia de calor pero, al mismo tiempo, generó calor en la superficie del cubo de papa, infiriéndose probablemente al colapso de las burbujas ejercidas en el proceso de cavitación, lo que pudo generar un cierto calentamiento. En un estudio de Li & Sun (2002) con ultrasonido, demostraron que los tiempos de irradiación más largos y las intensidades más altas podrían aumentar los tiempos de congelación debido al efecto de calentamiento del ultrasonido. De manera general los valores de temperatura menores a 0°C fueron entre los 310 y 450 segundos para las tres curvas. De acuerdo con Kiani *et al.* (2015) el punto de congelación en esferas de papa (*Solanum tuberosum*) de 0.02 m es de -2°C , sin embargo, en otra bibliografía consultada (Gengel, 2007) el punto de congelación de las papas es de -0.8°C , siendo este más cercano a los obtenidos en las curvas realizadas en los experimentos del presente trabajo. Comandini *et al.* (2013) realizaron una investigación donde estudiaron los efectos de la aplicación del ultrasonido de potencia en el proceso de congelación de cubos de papa. Su muestra control obtuvo una temperatura de nucleación -5.67°C , mientras que para su muestra tratada con ultrasonido a una temperatura de -3°C se obtuvo un valor de -3.37°C ocurriendo a un menor tiempo (9.23 min) en comparación con su muestra control (26.12 min). En los experimentos realizados en esta investigación con los cubos de papa de 0.02 m se observó lo contrario, ya que, en la curva control (Figura 5.5A) el punto de nucleación apareció antes que las muestras irradiadas con ultrasonido e incluso con una temperatura menor que la curva de 10 segundos. Para la curva de 7 segundos (Figura 5.5B) ésta necesitó mayor tiempo para poder comenzar con el punto de nucleación, obteniendo a pesar de esto, la menor temperatura de nucleación en comparación con las otras curvas.

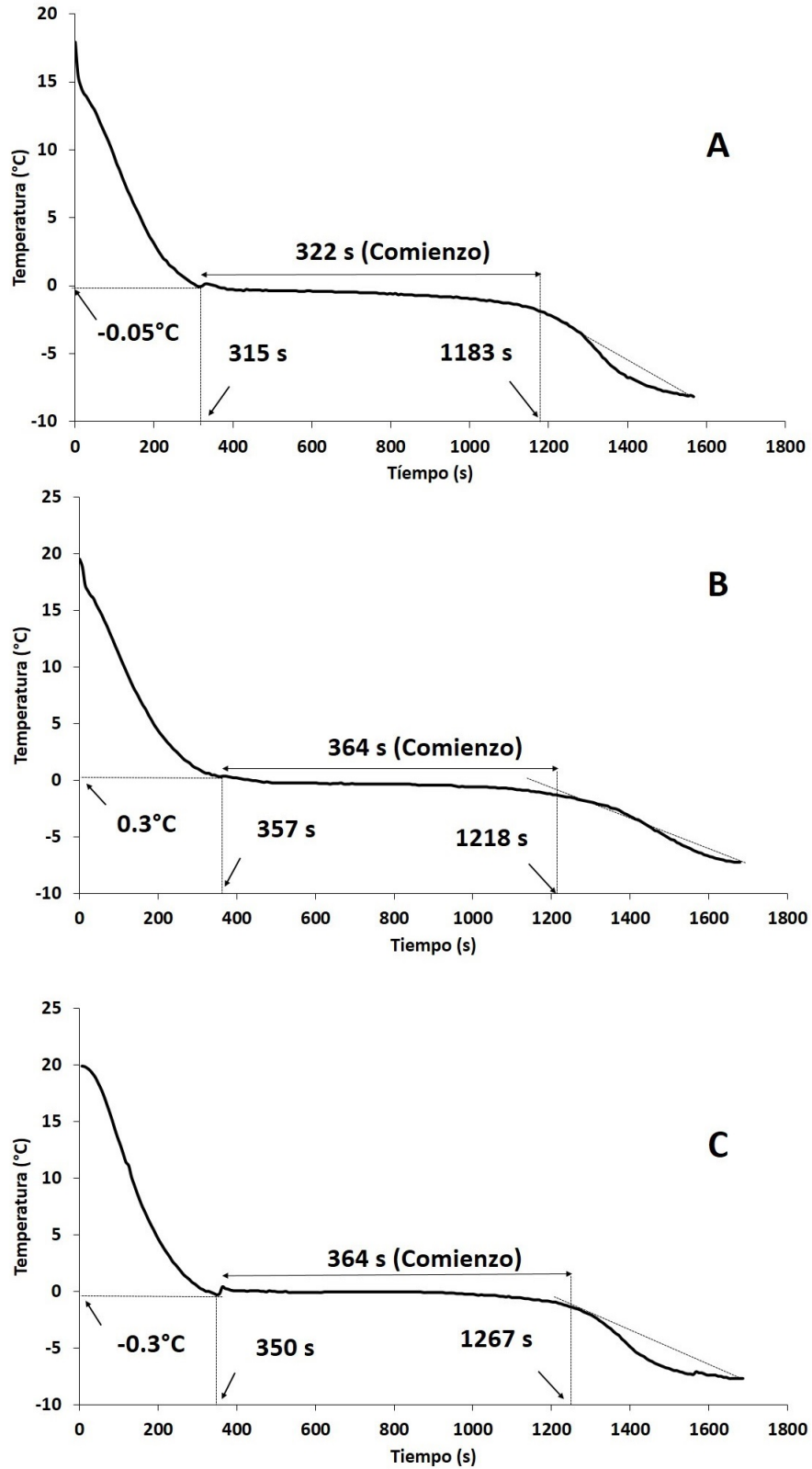


Figura 5.5. Curvas de congelación en cubos de papa y parámetros evaluados. A) Convencional, B) 7 segundos con UAI y C) 10 segundos con UAI.

El tiempo de congelación y en general la forma de las curvas del proceso de enfriamiento fueron distintos en las geometrías de cobre en comparación con las muestras de papa. Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de enfriamiento en muestras de cobre con aplicación de UAI mejora el tiempo del proceso de enfriamiento, reduciéndolo en comparación con las muestras no irradiadas, sin embargo, en las muestras de papa no sucede este mismo comportamiento debido a las características inherentes que el sistema tiene como su composición, ya que contiene carbohidratos y agua, principalmente, los cuales pueden actuar como núcleos de hielo, produciendo diferentes tiempos y temperaturas de enfriamiento, afectando el proceso de congelación y por lo tanto, a su cuantificación. Asimismo, la eficacia de la congelación asistida con ultrasonido en alimentos dependerá de la intensidad del ultrasonido, el tiempo de exposición a la irradiación y el modo de pulso utilizado durante la operación. (Xin *et al.*, 2014). Es importante considerar también que el ultrasonido tiene un efecto térmico ya que cuando se suministra más ultrasonido al medio, más energía acústica se convierte en calor y es absorbida por el medio. Generalmente el calor que produce el ultrasonido es mucho menor que el calor sensible o el calor latente que se requiere para eliminar la temperatura de las muestras, pero si la unidad de refrigeración no es capaz de eliminar el calor de inmediato, la cantidad de calor generada sería lo suficientemente alta para elevar la temperatura del medio de refrigeración, dando como resultado que la transferencia de calor en el proceso de congelación se retrase (Li & Sun, 2002). Por lo que se infiere que lo mencionado anteriormente podrían ser las causas por las cuales las curvas donde se aplicó el UAI en el presente trabajo obtuvieron los mayores valores de tiempo de congelación en comparación con las muestras control.

5.6. Determinación de las propiedades fisicoquímicas de la papa

Se determinaron las propiedades fisicoquímicas de las muestras de papa congeladas (ambos tratamientos) y a las muestras frescas, se determinó el color, la textura y además se hizo un análisis de imagen con el fin de determinar el efecto de la congelación de las papas tanto con aplicación de UAI como sin aplicación. Los resultados de cada una de los parámetros evaluados se describen a continuación.

5.6.1. Color

En la Tabla 5.4 se muestran los valores obtenidos de L^* y de las coordenadas de a^* y b^* de las muestras control (congelación sin aplicación de UAI), las muestras congeladas con aplicación de UAI durante 7 y 10s y las muestra frescas.

Tabla 5.4. Valores obtenidos de L^* y de las coordenadas a^* y b^* en muestras de papa congeladas con y sin aplicación de UAI y muestras frescas.

Parámetros	Control	Con UAI		Fresca
		7S	10S	
L^*	56.725±1.8738 ^a	59.665±0.7141 ^b	60.865±1.7324 ^b	60.6933±0.5917 ^b
a^*	-3.8366±0.4990 ^b	-4.0033±0.2730 ^b	-4.2066±0.1266 ^b	-5.9433±0.2804 ^a
b^*	11.7066±0.3957 ^b	10.06±0.4101 ^a	12.765±0.4879 ^b	12.92±0.8350 ^b

Media±desviación estándar (n = 3). Las letras minúsculas diferentes en la misma fila para un solo parámetro colorimétrico indican diferencias significativas entre las muestras ($p < 0.05$).

Se observa que los valores de L^* obtuvieron valores similares entre las muestras congeladas y la muestra fresca, incluso en las muestras donde se aplicó el ultrasonido durante 10s, ya que obtuvieron valores de L^* muy similares en comparación con la muestra fresca. Por otro lado, el menor valor de L^* (56.725±1.8738) se presentó en la muestra control, es decir, la muestra que se congelo sin aplicación de ultrasonido, ya que disminuyo su luminosidad en comparación con el resto de las muestras. Entre las muestras que se les aplico el ultrasonido a 7 y 10 s éstas mostraron valores muy similares significativamente ($p > 0.05$) entre ellas y entre la muestra fresca. Los valores de a^* corresponden al color verde, que aumentaron en las muestras control y las aplicadas con UAI, siendo la muestra control la que obtuvo mayor valor de a^* , es decir, perdió cierto color verde. Entre las muestras congeladas con ambos métodos y la muestra fresca se obtuvo una diferencia significativa ($p < 0.05$), sin embargo, entre las muestras congeladas mediante el método convencional y el uso del UAI no existió una diferencia significativa ($p > 0.05$). Del mismo modo que sucedió con L^* , los valores de a^* entre las muestras aplicadas con UAI a 7 y 10 segundos obtuvieron valores muy similares. Por último, los valores de b^* fueron similares entre todas las muestras, sin embargo, la muestra control y la de 7 segundos obtuvieron los menores valores en comparación con la muestra fresca, incluso la muestra de 7 segundos fue el menor valor (10.06±0.4101) en comparación con el resto de las muestras. De

manera general, los colores de las muestras si se vieron afectados por el proceso de congelación, y por otro lado y de acuerdo a los valores obtenidos, el ultrasonido no afectó de manera importante los valores de L^* y las coordenadas a^* y b^* , es decir, los colores de las muestras se vieron más afectadas por el proceso de congelación, que por la aplicación de UAI. Además, también se pudo notar que los valores de L^* , a^* y b^* entre las muestras frescas y las irradiadas con ultrasonido durante 10 segundos obtuvieron valores muy parecidos entre ellos. En un estudio realizado por Liang *et al.* (2015) en muestras de lichi demostraron que al congelar los lichis rápidamente se generó una lesión mecánica debido a los cristales de hielo aumentando la oxidación enzimática debido a la destrucción de las paredes celulares, generando un mayor contacto entre los compuestos fenólicos, el oxígeno y las enzimas, deduciendo los autores que la razón del aumento del pardeamiento en los lichis congelados rápidamente fue consecuencia del proceso, ya que no observaron lo mismo en las muestras de los lichis frescos.

La Tabla 5.5 muestra los valores de C^* , el ΔE y el ángulo de tonalidad h° en las muestras control (congelación sin aplicación de UAI), las muestras congeladas con aplicación de UAI (7 y 10s) y las muestra sfrescas.

Tabla 5.5. Valores obtenidos de C^* , ΔE^* y h° en muestras de papa congeladas con y sin aplicación de UAI y muestras frescas

Parámetro	Control	Con UAI		Frescas
		7s	10s	
c^*	12.3272±0.3354 ^b	10.8196±0.5217 ^a	13.4494±0.4096 ^b	14.2223±0.8959 ^c
ΔE^*	4.8566±1.4463 ^b	3.6676±0.3239 ^b	2.1197±0.2056 ^b	0a ^a
h°	73.2001±1.0076 ^c	68.4410±1.0825 ^b	71.6856±1.3407 ^c	65.2772±0.7664 ^a

Media±desviación estándar (n = 3). Las letras minúsculas diferentes en la misma fila para un solo parámetro colorimétrico indican diferencias significativas entre las muestras ($p < 0.05$).

Por un lado, los valores de C^* muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) entre las muestras congeladas con y sin tratamiento ultrasónico y las muestras frescas, observándose valores menores de C^* en las muestras congeladas con ambas técnicas, lo que indica que la brillantez de las papas disminuyó, volviéndolas opacas por el efecto de la congelación. Entre las muestras congeladas (ambos tratamientos) se obtuvieron valores muy similares de C^* , es decir, el ultrasonido no afectó la brillan-

tez de las papas, por lo que no se vieron opacadas por el efecto de la cavitación. El menor valor obtenido de C^* fue la muestra a la que se le aplicó el ultrasonido durante 7 segundos (10.8196 ± 0.5217). Por otro lado, el ΔE interpreta los cambios entre los colores de las muestras, por lo que considera las coordenadas L^* , a^* y b^* en el espacio Hunter Lab. Para las muestras procesadas en el presente trabajo, la ubicación de la muestra en el color tendió a tonos amarillos. Así, los valores de ΔE entre las muestras congeladas (con y sin ultrasonido) y la muestra fresca, si obtuvieron diferencias significativas ($p < 0.05$), debido a que para el cálculo del ΔE se usa como referencia esta última, indicando que el tratamiento de congelación (con y sin UAI) sí cambia el color amarillo. Entre la muestra control y las muestras irradiadas con ultrasonido (7 y 10s) no existieron diferencias significativas ($p > 0.05$), por lo que el color amarillo no se vio afectado por la presencia del ultrasonido en la congelación. Finalmente, el ángulo de tono en las muestras, el cual indica la tonalidad en un color, mostró que las papas que se congelaron por ambas técnicas fue mayor en comparación con la muestra fresca, indicando así que se obtuvieron tonos amarillos más oscuros por consecuencia del tratamiento de congelación. El mayor valor de h° fue en la muestra control (73.2001 ± 2.5057), mientras que para las muestras a las que se les aplicó el ultrasonido se mostraron valores similares entre ellas, existiendo diferencias solo con la muestra irradiada durante 7 segundos. Por lo tanto, los parámetros colorimétricos de forma general mostraron que la congelación mediante ambas técnicas disminuye la brillantez, aumentando el ángulo de tono por lo que la muestra mostró tonalidades amarillos-opacos. El ultrasonido no afectó al color de las muestras de forma significativa ($p > 0.05$), por lo que solo se obtuvieron muestras amarillas ligeramente más opacas en comparación con las muestras congeladas convencionalmente, lo que pudiera indicar que el efecto de la cavitación no afectó a la estructura de las muestras, siendo deseable para un proceso de congelación.

5.6.2. Textura

La Tabla 5.6 muestra los valores de firmeza (N) obtenidos durante el análisis de textura en las muestras control, las congeladas con aplicación de UAI (7 y 10s) y las muestras frescas. Se observa que los valores entre todas las muestras no obtuvieron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre ellas, sin embargo, la muestra que obtuvo el mayor valor de textura fue la muestra control (13.1839 ± 1.3615) y la de menor valor

fue la muestra a la que se le aplicó el UAI durante 10 segundos (11.3155 ± 0.737), siendo también esta muestra la que obtuvo el valor más similar a la muestra fresca. De manera general la congelación sin y con aplicación de UAI no afectó de manera importante la textura de las papas. Existen diferentes factores que contribuyen a las propiedades mecánicas del tejido vegetal, como la resistencia de la pared celular a la compresión y la fuerza de tracción, la turgencia celular, la fuerza de unión celular y la densidad del empaquetamiento celular (Chiralt *et al.*, 2001; Vallespir *et al.*, 2019). Por lo que el UAI no estaría afectando dichos factores.

Tabla 5.6. Parámetros de firmeza en muestras de papa congeladas (control y con aplicación de UAI a 7 y 10s) y papas frescas.

Parámetro	Control	Con UAI		Fresca
		7S	10S	
Firmeza (N)	13.1839 ± 1.3615^a	12.0179 ± 1.1654^a	11.3155 ± 0.7375^a	11.9985 ± 1.6870^a

Media \pm desviación estándar (n = 3). Las letras minúsculas diferentes en la misma fila para un solo parámetro de textura indican diferencias significativas entre las muestras ($p < 0.05$).

5.6.3. Análisis de imagen

Se realizó el análisis de imagen de la estructura de las muestras de papa en la corteza (parte exterior) y de su tejido vascular (parte interior). Las Figuras 5.6 y 5.7 muestran las imágenes tomadas de cada una de las muestras tratadas congeladas y descongeladas respectivamente, donde las imágenes A, C y E corresponden a la parte exterior de la muestra, mientras que las imágenes B, D y F corresponden a la parte interior. Por un lado, en la Figura 5.6 se observa que para todas las imágenes correspondientes a la parte exterior (A, C y E) presentan mayor brillo en comparación con las imágenes de la parte interior de las muestras (B, D y F), esto podría deberse a que la parte exterior de las muestras presentaran una mayor presencia de cristales de agua provenientes del medio de refrigeración, lo cual hacía que la luz se reflejara. Caso contrario fue observado en las muestras internas donde se presentó una textura granular brillante, la cual podría ser consecuencia de la presencia de pequeños cristales de agua congelada distribuidos de manera homogénea, respetándose una estructura ligeramente porosa.

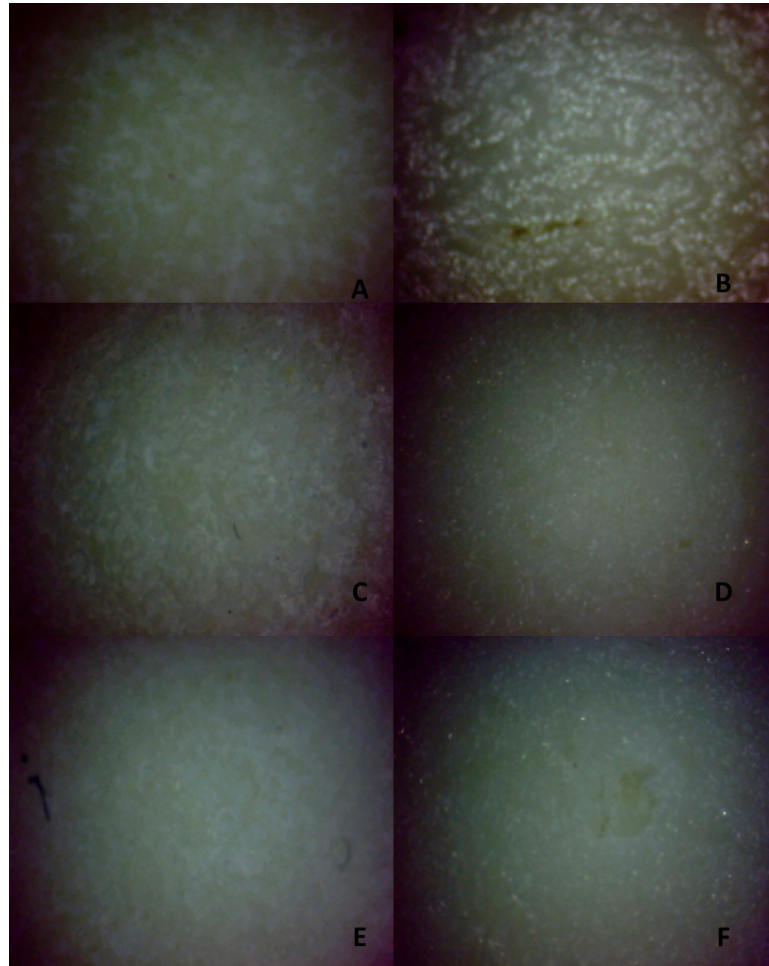


Figura 5.6. Análisis de imagen en muestras de papas congeladas mediante técnica convencional (A) Control exterior, (B) Control interior y con aplicación de UAI (C) 7s exterior, (D) 7s interior, (E) 10s exterior y (F) 10s interior

Por otro lado, en la Figura 5.7 se observan las muestras descongeladas en donde las imágenes correspondientes a la parte exterior (A, C y E) fueron muy similares entre ellas, observándose porosidad sin presencia de brillo, no mostrando cambios en su estructura por efecto de los tratamientos. Mientras que para las imágenes de las muestras internas (B, D y F) solo se observó una diferencia en la Figura 5.7B, la cual correspondía a la muestra congelada control (sin aplicación de UAI), ya que en ella se pueden observar la presencia de ligeras grietas y una textura acuosa, mientras que las otras (con aplicación de UAI) presentaron una textura más porosa.

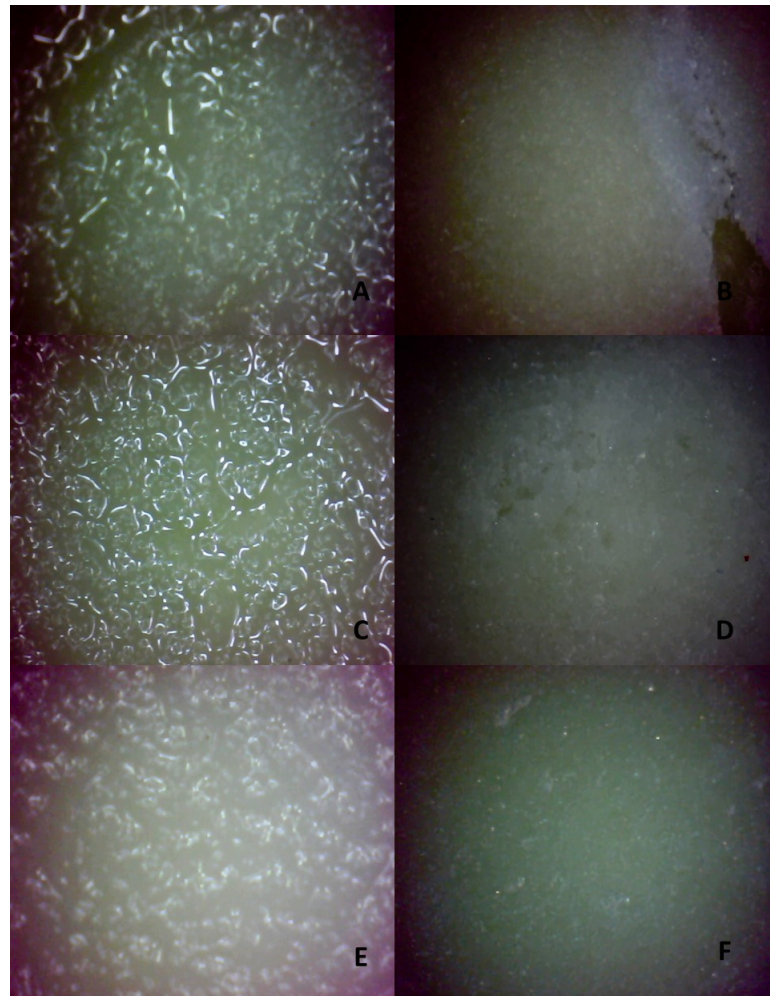


Figura 5.7. Análisis de imagen en muestras de papas descongeladas mediante técnica convencional (A) Control exterior, (B) Control interior y con aplicación de UAI (C) 7s exterior, (D) 7s interior, (E) 10s exterior y (F) 10s interior

Finalmente comparando las imágenes de las muestras congeladas (Figura 5.6) y las descongeladas (Figura 5.7) se observó que las muestras congeladas externas tienen menor brillo que las descongeladas, lo que podría deberse a que ya no tiene la misma cantidad de agua en la superficie. Con lo anterior se puede inferir que el proceso de congelación asistida con ultrasonido, durante los dos tiempos de congelación (7 y 10s) no afectó de manera importante la estructura de las muestras de papa, de manera contraria a las muestras control (sin aplicación de UAI), ya que éstas después del proceso de congelación mostraron la mayor diferencia en la estructura, lo cual podría deberse a que durante la congelación asistida con el ultrasonido se

formaron un mayor número de cristales pequeños y homogéneos, mientras que en el proceso de congelación convencional, éste pudo haber generado un crecimiento de cristales más grandes y no homogéneos. Se sabe que la calidad estructural de los alimentos congelados depende principalmente del tamaño y la distribución de los cristales de hielo formados durante los procesos de congelación. Para los productos vegetales que son sensibles a los cambios de color, una buena integridad microestructural ayuda a reducir la posibilidad del daño enzimático y la decoloración resultante (Duan *et al.*, 2007; Yoon, 2002).

VI. Conclusiones

- Se utilizó una solución analítica a la ecuación de transferencia de calor durante el proceso de enfriamiento en geometrías de cobre, que describiese adecuadamente el comportamiento durante el proceso. Dicha solución se desarrolló por medio de la técnica de transformada de Laplace y la separación de variables.
- La transferencia de calor durante el proceso de enfriamiento asistido con UAI se vio afectada por la posición dentro del baño ultrasónico, asimismo la profundidad también afectó de forma considerable a la transferencia, ya que al colocar las muestras más cerca de los transductores dentro del equipo, los tiempos de enfriamiento disminuyeron, aumentando también los valores del coeficiente de transferencia de calor (h).
- Dado que la potencia suministrada durante la aplicación del UAI en el proceso de enfriamiento se pierde debido a la disipación en forma de calor y a la producción de burbujas de cavitación, entre otros factores, fue necesario el cálculo de la potencia real entregada al medio, así como la intensidad ultrasónica para mejorar el proceso de transferencia de energía. Por lo que se concluyó que existe una relación entre la intensidad ultrasónica y la velocidad de transferencia de calor convectiva.
- Los valores del coeficiente de transferencia de calor convectivo (h) calculados a partir de los datos experimentales y por medio de la solución analítica fueron mayores en las geometrías donde se aplicó el UAI durante el proceso de enfriamiento en comparación con las de control (sin aplicación de UAI). Por otro lado la geometría afectó el fenómeno de transferencia de calor, ya que las geometrías de cubo obtuvieron mayores valores de h en comparación con las geometrías de esfera. Finalmente se determinó que la solución analítica fue capaz de predecir de manera confiable el comportamiento del proceso de enfriamiento.
- El proceso de congelación asistido con UAI de las papas mostró un comportamiento diferente al proceso de enfriamiento asistido con UAI en las geometrías de cobre, ya que en las muestras de papa el tiempo de congelación no se

redujo al aplicar el UAI, por el contrario la muestra control (sin aplicación de UAI) mostro el menor tiempo de enfriamiento en comparación con las muestras irradiadas con UAI durante 7 y 10s, infiriéndose a que existe una influencia de la propia composición del alimento y al calentamiento del alimento por el tiempo de irradiación y la intensidad ultrasónica, entre otros factores.

- Se concluyó que el ultrasonido no afecto de forma importante las propiedades fisicoquímicas del alimento, manteniendo valores muy similares de color, textura y estructura externa e interna a los de la muestra control.

Bibliografía

- Abbott, JA, & Liljedahl, LA. 1994. Relationship of sonic resonant frequency to compression tests and Magness-Taylor firmness of apples during refrigerated storage. *Transactions of the ASAE*, **37**(4), 1211–1215.
- Abbott, JA, & Massie, DR. 1995. Nondestructive dynamic force/deformation measurement of kiwifruit firmness (*Actinidia deliciosa*). *Transactions of the ASAE*, **38**(6), 1809–1812.
- Association, Chilled Food, *et al.* 1997. *Guidelines for good hygienic practice in the manufacture of chilled foods*. The Association.
- Azuola, Rocío, & Aguilar, Pedro Vargas. 2007. Extracción de sustancias asistida por ultrasonido (EUA). *Tecnología en marcha*, **20**(4), 1.
- Baehr, Hans Dieter, & Stephan, Karl. *Heat and mass transfer*, 1998.
- Bainy, Eduarda M, Corazza, Marcos L, & Lenzi, Marcelo K. 2015. Measurement of freezing point of tilapia fish burger using differential scanning calorimetry (DSC) and cooling curve method. *Journal of Food Engineering*, **161**, 82–86.
- Barreiro, José A, & Sandoval, Aleida J. 2006. *Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas*. Equinoccio.
- Biglia, Alessandro, Comba, Lorenzo, Fabrizio, Enrico, Gay, Paolo, & Aimonino, Davide Ricauda. 2016. Case studies in food freezing at very low temperature. *Energy Procedia*, **101**, 305–312.
- Bulut, Merve, Bayer, Özgür, Kırtıl, Emrah, & Bayındırlı, Alev. 2018. Effect of freezing rate and storage on the texture and quality parameters of strawberry and green bean frozen in home type freezer. *International Journal of Refrigeration*, **88**, 360–369.
- Capote, F Priego, & de Castro, MD Luque. 2007. *Analytical applications of ultrasound*. Vol. 26. Elsevier.
- Cárcel, JA, Benedito, J, Bon, J, & Mulet, A. 2007. High intensity ultrasound effects on meat brining. *Meat Science*, **76**(4), 611–619.
- Chemat, Farid, Khan, Muhammed Kamran, *et al.* 2011. Applications of ultrasound in food technology: processing, preservation and extraction. *Ultrasonics sonochemistry*, **18**(4), 813–835.
- Cheng, Xin-feng, Zhang, Min, Adhikari, Benu, Islam, Md Nahidul, & Xu, Bao-

- guo. 2014. Effect of ultrasound irradiation on some freezing parameters of ultrasound-assisted immersion freezing of strawberries. *International Journal of Refrigeration*, **44**, 49–55.
- Chiralt, A, Martínez-Navarrete, N, Martínez-Monzó, J, Talens, P, Moraga, G, Ayala, A, & Fito, P. 2001. Changes in mechanical properties throughout osmotic processes: cryoprotectant effect. *Journal of Food Engineering*, **49**(2-3), 129–135.
- Cleland, AC, & Earle, RL. 1984. Freezing time predictions for different final product temperatures. *Journal of Food Science*, **49**(4), 1230–1232.
- Cleland, DJ, Cleland, AC, & Earle, RL. 1986. Prediction of freezing and thawing times for foods—a review. *International Journal of Refrigeration*, **9**(3), 182.
- Comandini, P, Blanda, G, Soto-Caballero, MC, Sala, V, Tylewicz, U, Mujica-Paz, H, Frago, A Valdez, & Toschi, T Gallina. 2013. Effects of power ultrasound on immersion freezing parameters of potatoes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **18**, 120–125.
- De Castro, MD Luque, & Priego-Capote, F. 2007. Ultrasound-assisted crystallization (sonocrystallization). *Ultrasonics sonochemistry*, **14**(6), 717–724.
- Duan, Xuewu, Wu, Genfu, & Jiang, Yueming. 2007. Evaluation of the antioxidant properties of litchi fruit phenolics in relation to pericarp browning prevention. *Molecules*, **12**(4), 759–771.
- Erdogdu, Ferruh. 2008. *Optimization in food engineering*. CRC Press.
- Erickson, Marilyn C, & Hung, Yen-Con. 2012. *Quality in frozen food*. Springer Science & Business Media.
- Gallego-Juárez, JA. 1998. Some applications of air-borne power ultrasound to food processing. *Pages 127–143 of: Ultrasound in food processing*. Chapman & Hall, London, UK.
- Gengel, YA. 2007. *Transferencia de Calor y Masa, Un enfoque Práctico*.
- Gómez-Sánchez, AI, Cerón-Carrillo, TG, Rodríguez-Martínez, V, & Vázquez-Aguilar, MM. 2007. Aspectos tecnológicos de la congelación en alimentos. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, **1**, 80–96.
- Hagenson, Leigh C, & Doraiswamy, LK. 1998. Comparison of the effects of ultrasound and mechanical agitation on a reacting solid-liquid system. *Chemical Engineering Science*, **53**(1), 131–148.
- Heldman, Dennis R, Lund, Daryl B, & Sabliov, Cristina. 2018. *Handbook of food engineering*. CRC press.

- Incropera, Frank, & De Witt, David P. 1999. *Fundamentos de transferencia de calor cuarta edición*.
- Jambrak, Anet Režek, Mason, Timothy J, Paniwnyk, Larysa, & Lelas, Vesna. 2007. Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. *Journal of Food Engineering*, **81**(1), 88–97.
- James, Christian, Purnell, Graham, & James, Stephen J. 2015. A review of novel and innovative food freezing technologies. *Food and bioprocess technology*, **8**(8), 1616–1634.
- Kiani, Hossein, & Sun, Da-Wen. 2011. Water crystallization and its importance to freezing of foods: A review. *Trends in Food Science & Technology*, **22**(8), 407–426.
- Kiani, Hossein, & Sun, Da-Wen. 2016. Numerical modeling of particle to fluid heat transfer during ultrasound assisted immersion cooling. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **99**, 25–32.
- Kiani, Hossein, Sun, Da-Wen, Delgado, Adriana, & Zhang, Zhihang. 2012. Investigation of the effect of power ultrasound on the nucleation of water during freezing of agar gel samples in tubing vials. *Ultrasonics Sonochemistry*, **19**(3), 576–581.
- Kiani, Hossein, Zhang, Zhihang, & Sun, Da-Wen. 2015. Experimental analysis and modeling of ultrasound assisted freezing of potato spheres. *Ultrasonics sonochemistry*, **26**, 321–331.
- Legay, Mathieu, Gondrexon, Nicolas, Le Person, Stéphane, Boldo, Primius, & Bontemps, André. 2011. Enhancement of heat transfer by ultrasound: review and recent advances. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011.
- Li, Bing, & Sun, Da-Wen. 2002. Effect of power ultrasound on freezing rate during immersion freezing of potatoes. *Journal of Food Engineering*, **55**(3), 277–282.
- Liang, Dongwu, Lin, Fengying, Yang, Gongming, Yue, Xiju, Zhang, Quankai, Zhang, Zhaoqi, & Chen, Houbin. 2015. Advantages of immersion freezing for quality preservation of litchi fruit during frozen storage. *LWT-Food Science and Technology*, **60**(2), 948–956.
- MANNAPPERUMA, J ATAL D, & SINGH, R PAUL. 1988. Prediction of freezing and thawing times of foods using a numerical method based on enthalpy formulation. *Journal of Food Science*, **53**(2), 626–630.
- Matsuura, Kazuo, Hirotsune, Masato, Nunokawa, Yataro, Satoh, Masanori, & Hon-

- da, Keisuke. 1994. Acceleration of cell growth and ester formation by ultrasonic wave irradiation. *Journal of fermentation and bioengineering*, 77(1), 36–40.
- McClements, D Julian. 1995. Advances in the application of ultrasound in food analysis and processing. *Trends in Food Science & Technology*, 6(9), 293–299.
- Mortazavi, A, & Tabatabaie, F. 2008. Study of ice cream freezing process after treatment with ultrasound. *World Applied Sciences Journal*, 4(2), 188–190.
- Mulet, A, Benedito, J, Bon, J, & Sanjuan, N. 1999. Low intensity ultrasonics in food technology/Revisión: Ultrasonidos de baja intensidad en tecnología de alimentos. *Food Science and Technology International*, 5(4), 285–297.
- Năstase, Gabriel, Perez, Pedro Alejandro, Èerban, Alexandru, Dobrovicescu, Alexandru, Ètefănescu, Mariana-Florentina, & Rubinsky, Boris. 2016. Advantages of isochoric freezing for food preservation: A preliminary analysis. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 78, 95–100.
- Park, SH, & Roh, YR. 2001. Cooker, Int. Pat. WO, 113773.
- Pham, QT. 1984. Extension to Planck's equation for predicting freezing times of foodstuffs of simple shapes. *International Journal of Refrigeration*, 7(6), 377–383.
- Pham, QT. 1986. Simplified equation for predicting the freezing time of foodstuffs. *International Journal of Food Science & Technology*, 21(2), 209–219.
- Pico, Yolanda. 2013. Ultrasound-assisted extraction for food and environmental samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 43, 84–99.
- Povey, Malcolm JW, & Mason, Timothy J. 1998. *Ultrasound in food processing*. Springer Science & Business Media.
- Rahman, M Shafiur, Guizani, Nejib, Al-Khaseibi, Mohammed, Al-Hinai, Salim Ali, Al-Maskri, Salha Saleh, & Al-Hamhami, Khalid. 2002. Analysis of cooling curve to determine the end point of freezing. *Food Hydrocolloids*, 16(6), 653–659.
- Reid, David. 2012. *The Properties of Water in Foods ISOPOW 6*. Springer Science & Business Media.
- Rostami, Zakie, Rahimi, Masoud, & Azimi, Neda. 2018. Using high-frequency ultrasound waves and nanofluid for increasing the efficiency and cooling performance of a PV module. *Energy Conversion and Management*, 160, 141–149.
- Sahagian, Michael E, & Goff, H Douglas. 1996. Fundamental aspects of the freezing process. *FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY-NEW YORK-MARCEL DEKKER-*, 1–50.

- Salvadori, Viviana Olga. 1994. *Transferencia de calor durante la congelación, el almacenamiento y la descongelación de alimentos*. Ph.D. thesis, Facultad de Ingeniería.
- Sánchez, Emma S, Simal, Susana, Femenia, Antoni, Benedito, José, & Rosselló, Carmen. 1999. Influence of ultrasound on mass transport during cheese brining. *European Food Research and Technology*, 209(3-4), 215–219.
- Savadkoohi, Sobhan, Hoogenkamp, Henk, Shamsi, Kambiz, & Farahnaky, Asgar. 2014. Color, sensory and textural attributes of beef frankfurter, beef ham and meat-free sausage containing tomato pomace. *Meat science*, 97(4), 410–418.
- Sun, Da-Wen. 2016. *Handbook of frozen food processing and packaging*. CRC Press.
- Tassou, SA, Lewis, JS, Ge, YT, Hadawey, A, & Chaer, I. 2010. A review of emerging technologies for food refrigeration applications. *Applied Thermal Engineering*, 30(4), 263–276.
- Tervo, Jan Topi, Mettin, Robert, & Lauterborn, Werner. 2006. Bubble cluster dynamics in acoustic cavitation. *Acta Acustica united with Acustica*, 92(1), 178–180.
- Thompson, LH, & Doraiswamy, LK. 1999. Sonochemistry: science and engineering. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 38(4), 1215–1249.
- Vallespir, Francisca, Rodríguez, Óscar, Eim, Valeria S, Rosselló, Carmen, & Simal, Susana. 2019. Effects of freezing treatments before convective drying on quality parameters: Vegetables with different microstructures. *Journal of Food Engineering*, 249, 15–24.
- VELAZQUEZ RODRIGUEZ, MARCO ANTONIO, *et al.* 2014. CONGELACION DE ALIMENTOS.
- Xin, Ying, Zhang, Min, & Adhikari, Benu. 2014. Ultrasound assisted immersion freezing of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis* L.). *Ultrasonics sonochemistry*, 21(5), 1728–1735.
- Xu, Baoguo, Zhang, Min, Bhandari, Bhesh, & Cheng, Xinfeng. 2014. Influence of power ultrasound on ice nucleation of radish cylinders during ultrasound-assisted immersion freezing. *International Journal of Refrigeration*, 46, 1–8.
- Yoon, KS. 2002. Texture and microstructure properties of frozen chicken breasts pretreated with salt and phosphate solutions. *Poultry science*, 81(12), 1910–1915.
- Zhang, Zi, Sun, Da-Wen, Zhu, Zhiwei, & Cheng, Lina. 2015. Enhancement of crystallization processes by power ultrasound: current state-of-the-art and research advances. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(4), 303–316.