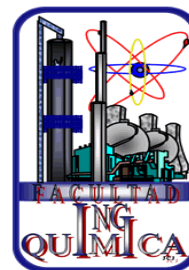




**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DOCTORADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**



**“EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ULTRASONIDO DE ALTA  
INTENSIDAD SOBRE EL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE  
ENERGÍA DURANTE LA CONGELACIÓN POR INMERSIÓN DE  
MATRICES ALIMENTICIAS”**

**PRESENTA:**

**MIQ. TANIA MARTÍNEZ RAMOS**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:  
DOCTORA EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**DIRECTORES DE TESIS:**

**DRA. EDITH CORONA JIMÉNEZ**

**DR. IRVING ISRAEL RUIZ LÓPEZ**

**ENERO 2022**



**BUAP**

Oficio: FIQ/SIEP/054/2022

**Mtro. Ricardo Valderrama Valdez**  
**Director de la Dirección de Administración Escolar**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**  
**PRESENTE**

Reciba un afectuoso saludo y al mismo tiempo me permito presentar a usted a los integrantes del jurado de examen que para obtener el grado de Doctora en Ingeniería Química sustentará la

**M.I.Q. TANIA MARTÍNEZ RAMOS**

pertenciente a la generación 2017 con número de matrícula **217570431** y cuyo tema de tesis es: "EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ULTRASONIDO DE ALTA INTENSIDAD SOBRE EL PROCESO DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA DURANTE LA CONGELACIÓN POR INMERSIÓN DE MATRICES ALIMENTICIAS".

Dicho jurado está integrado por:

**JURADO**

Presidente	Dra. Claudia Santacruz Vázquez
Secretario	Dr. Álvaro Sampieri Croda
Vocal	Dr. Miguel Ángel García Alvarado
Vocal	Dr. Alejandro Escobedo Morales
Vocal	Dra. Edith Corona Jiménez

Asimismo, comunico a usted que la alumna cumple con todos los requisitos para poder llevar a cabo su examen de grado, y que los integrantes de este jurado están citados con anticipación para la fecha y lugar indicados a continuación.

FECHA DE EXAMEN: 17 de junio 2022  
HORA: 09:00 horas  
LUGAR: Plataforma Microsoft Teams  
DÍA: viernes  
Modalidad en línea.

Sin otro particular, me es grato quedar de usted.

Atentamente,  
"Pensar bien, para vivir mejor"  
H. Puebla de Z. a 1 de junio de 2022

**Dra. Esmeralda Vidal Robles**  
Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado



c.c.p. Archivo  
E-mail: esmeralda.vidal@correo.buap.mx

Facultad  
de Ingeniería  
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San  
Manuel, Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C. P. 72590  
01 (222) 229 55 00  
Exts. 7250 y 7251



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA  
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO  
DOCTORADO EN INGENIERÍA QUÍMICA**



**ACTA DE REVISIÓN, LIBERACIÓN E IMPRESIÓN DE TESIS**

Nombre de la estudiante: **Tania Martínez Ramos**

Matrícula: **217570431**




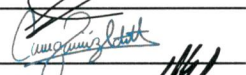
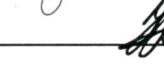

Nombre del director: **Edith Corona Jiménez**

Nombre del codirector: **Irving Israel Ruiz López**

**Título de la Tesis:**

**“Evaluación del Efecto del Ultrasonido de Alta Intensidad sobre el Proceso de Transferencia de Energía Durante la Congelación por Inmersión de Matrices Alimenticias”**

**Comisión Revisora:**

Presidente:	Claudia Santacruz Vázquez	Firma: 
Secretario(a):	Álvaro Sampieri Croda	Firma: 
Vocal (1):	Miguel Ángel García Alvarado	Firma: 
Vocal (2):	Alejandro Escobedo Morales	Firma: 
Vocal (3):	Edith Corona Jiménez	Firma: 
Suplente:	Irving Israel Ruiz López	Firma: 

Los integrantes de la Comisión Revisora expresamos que hemos leído y revisado el manuscrito de la tesis de doctorado que presenta la estudiante arriba indicada, por lo que estamos de acuerdo en que se proceda con la impresión definitiva de la tesis y que la estudiante presente su defensa y examen de grado en la fecha, horario y lugar que se indican a continuación.

Fecha de examen: 17 de junio de 2022

Hora: 09:00 horas

Día de la semana: Viernes

Lugar: Plataforma Institucional Microsoft Teams

---

# AGRADECIMIENTOS

A través de estas líneas quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que de alguna forma contribuyeron al desarrollo del presente trabajo.

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, a la Facultad de Ingeniería Química y al Cuerpo Académico Consolidado “Innovación en Tecnología para el Desarrollo de Procesos Alimenticios”, debido a que la presente tesis se desarrolló dentro de sus instalaciones.

A mi directora de tesis, la Dra. Edith Corona Jiménez, por enriquecerme día tras día con su experiencia y estímulo constante, tanto en la etapa experimental como en la escritura, y sobre todo por su amistad y confianza.

A mi director de tesis, el Dr. Irving Israel Ruiz López, por su interés, ayuda y disposición, así como por compartir su valioso conocimiento el cual ha sido de gran ayuda para la culminación de este trabajo.

A los miembros del jurado, la Dra. Claudia Santacruz Vázquez, Dr. Alejandro Escobedo Morales, Dr. Álvaro Sampieri Croda y al Dr. Miguel Ángel García Alvarado, por las valiosas contribuciones y observaciones que hicieron durante todo el desarrollo del trabajo y por el tiempo que dedicaron para revisarlo, aún a pesar de tantas actividades que los ocupan.

Al Dr. José Javier Benedito Fort por su amabilidad, compromiso y apoyo para poder realizar mi estancia en el Grupo de Análisis y Simulación de Procesos del Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universitat Poliècnica de València (España).

Al Dr. Nicholas James Watson, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Nottingham (Reino Unido), por su colaboración y entera disposición durante todo este tiempo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por haberme otorgado una beca (CVU/becario580569) para realizar mis estudios de doctorado. Asimismo, a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) de la BUAP, por los apoyos económicos brindados.

A mis profesores, compañeros de generación, los cuales fueron parte fundamental para mi formación profesional, a mis compañeras del grupo de trabajo de la Dra. Edith Corona Jiménez por su ayuda, su amistad y por hacer de este tiempo un ambiente agradable y de confianza.

A mi hijo Matías, por ser mi motivación principal para superarme, así como el motor que me impulsó a continuar en los momentos más difíciles del doctorado, por lo cual esta tesis la dedico a él. A Roberto, por ser mi compañero de vida, quien en estos años siempre ha tenido palabras de amor y comprensión. A mis padres Ángel y Fabiola, quienes han tenido una vida de lucha, sacrificios y esfuerzos constantes, por lo que mi esfuerzo es inspirado en ustedes. A mis hermanos Ulises, Yanko y Ángel por siempre cuidarme y estar ahí cuando más lo he necesitado.

# RESUMEN

La transferencia de calor es un fenómeno presente en diferentes operaciones de procesamiento dentro del área de la Ingeniería Química. Estas operaciones con frecuencia involucran etapas de calentamiento o enfriamiento entre fluidos y materiales sólidos, donde la conducción y la convección representan los mecanismos dominantes. Dichas operaciones son aplicables en áreas específicas como lo es el área de los alimentos, en donde existe la necesidad de mejorar la eficiencia de la transferencia de calor en estas operaciones mediante la aplicación de tecnologías novedosas. Los ultrasonidos, los cuales son ondas de presión que ocurren en ciclos repetitivos (20 kHz - 100 kHz), han sido utilizados para mejorar procesos de transferencia de calor a niveles de energía adecuados y debido al efecto que generan de transmisión y cavitación acústica, por lo que sus efectos son principalmente mecánicos (no térmicos) y su uso en procesos a bajas temperaturas resulta interesante, representando una alternativa para tener productos de calidad. En este sentido, el objetivo de la presente tesis fue evaluar el efecto de la aplicación del ultrasonido de alta intensidad (UAI) sobre el proceso de transferencia de energía y del mecanismo de nucleación durante la congelación por inmersión de diferentes matrices alimenticias, así como su influencia sobre las propiedades fisicoquímicas de éstas. Para ello, con la finalidad de conocer la manera en que se lleva a cabo la transferencia de calor bajo un campo acústico, como primera etapa se determinó la distribución de la actividad cavitacional dentro de un baño ultrasónico en función de la intensidad ultrasónica ( $IU$ ) y se relacionó su efecto sobre el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ), el cuál se determinó mediante el uso de una solución analítica; asimismo, se analizó el comportamiento de la onda acústica durante el proceso de enfriamiento. Los resultados de esta primera etapa indicaron que la presencia de un campo acústico afectó significativamente ( $p < 0.05$ ) la transferencia de calor, incrementándola en todos los casos.

Por lo tanto, se encontró una relación lineal positiva entre el valor de la  $IU$  y el valor del  $h$ . También se observó que la distribución de la actividad cavitacional influye sobre el rendimiento de la transferencia, ya que ésta se vio afectada por el comportamiento de la onda acústica, el cual está en función de sus parámetros acústicos (longitud de onda y amplitud) y sus efectos físicos (Coalescencia de burbujas, efecto de desacoplamiento, blindaje de burbujas), siendo importante determinar una adecuada posición de la muestra dentro del baño acústico si se requiere de una mayor eficiencia durante el proceso de transferencia de energía. Por otro lado, como segunda etapa del presente trabajo, se estableció como propósito el desarrollar una nueva correlación de transferencia de calor por convección, la cual permitiera entender mejor el proceso de enfriamiento/calentamiento asistido con irradiación acústica. Así, bajo diferentes parámetros de procesamiento, se desarrolló una ecuación de Nusselt ( $Nu$ ) la cual se obtuvo asumiendo un número  $Nu$  aparente en el proceso

asistido con ultrasonido, expresado como la suma de las contribuciones de la convección forzada y los efectos de la cavitación y transmisión acústica. Además, se aplicó un modelo de conducción con un término fuente y la correlación propuesta en cinéticas de calentamiento acelerado con UAI en muestras de jamón curado previamente reportadas en la literatura. Los resultados manifestaron que la validación de la ecuación desarrollada de  $Nu$  logró una reproducción satisfactoria de los datos experimentales y que la presencia del ultrasonido mejora las operaciones que involucran la transferencia de energía, ya que existe un aumento de los coeficientes de transferencia de calor y la absorción directa de la energía ultrasónica por parte de la muestra alimenticia. Por consiguiente, los resultados teóricos pueden ser útiles para el diseño de experimentos y así poder evaluar el poder ultrasónico absorbido por las muestras alimenticias y su dependencia con otras variables del proceso. Finalmente, como última etapa, con la intención de evaluar el efecto que el UAI tiene sobre el tiempo de congelación, el proceso de nucleación y las propiedades fisicoquímicas de matrices alimenticias, se estimó, por un lado, el tiempo de congelación para las diferentes etapas del proceso con y sin aplicación del UAI y se comparó con tiempos determinados mediante ecuaciones analíticas previamente propuestas por bibliografía. Por otro lado, se llevó a cabo el análisis de la etapa de nucleación mediante la aplicación de la ecuación previamente desarrollada y el uso de curvas de congelación experimentales a distintos tiempos de irradiación ultrasónica y finalmente, los posibles cambios ocurridos sobre las propiedades fisicoquímicas de las matrices alimenticias se evaluaron mediante el análisis del color, la textura, el contenido y la capacidad antioxidante de compuestos fenólicos en las muestras sometidas a diferentes condiciones de procesamiento. Así, los resultados demostraron que el efecto de la irradiación acústica puede inducir una nucleación temprana en las muestras alimenticias, reduciendo el tiempo de congelación y afectando en menor medida las propiedades fisicoquímicas de las muestras congeladas por inmersión asistida con UAI. Lo anterior debido a que los efectos mecánicos del ultrasonido reducen la resistencia al flujo local y mejoran la velocidad de transferencia de calor al interrumpir la capa límite del fluido, además las burbujas de cavitación generadas por el ultrasonido, posiblemente actuaron como núcleos para el crecimiento cristalino, promoviendo un inicio de la nucleación del hielo anticipado. Por lo tanto, el presente trabajo de tesis contribuyó a un entendimiento más profundo del efecto e influencia que tiene el UAI sobre la transferencia de calor mediante un análisis más detallado de la interacción existente entre las diferentes variables involucradas en operaciones de enfriamiento y/o congelación, por lo que esta tecnología puede ser considerada como una tecnología interesante para intensificar los procesos a bajas temperaturas sin afectar en gran medida a la calidad del producto final.

# ABSTRACT

Heat transfer is a phenomenon present in different processing operations within the area of Chemical Engineering. These often involve stages of heating or cooling between fluids and solid materials, where conduction and convection represent the dominant mechanisms. These operations are applicable in specific areas such as the food area, where there is a need to improve the efficiency of heat transfer in these operations through the application of novel technologies. Ultrasounds, which are pressure waves that occur in repetitive cycles (20 kHz - 100 kHz), have been used to improve heat transfer processes at adequate energy levels and due to the effect they generate of acoustic transmission and cavitation, therefore, its effects are mainly mechanical (not thermal) and its use in processes at low temperatures is interesting, representing an alternative to have quality products.

In this sense, the objective of this thesis was to evaluate the effect of the application of high intensity ultrasound (HIU) on the energy transfer process and the nucleation mechanism during freezing by immersion of different food matrices, as well as, its influence on the physicochemical properties of these. For this, in order to know how the heat transfer is carried out under an acoustic field, as a first stage, the distribution of cavitation activity within an ultrasonic bath was determined as a function of the ultrasonic intensity ( $UI$ ) and its effect on the convection heat transfer coefficient ( $h$ ) was related, which was determined by using an analytical solution; likewise, the behavior of the acoustic wave during the cooling process was analyzed. The results of this first stage indicated that the presence of an acoustic field significantly affected ( $p < 0.05$ ) heat transfer, increasing it in all cases. Therefore, a positive linear relationship was found between the value of  $UI$  and the value of  $h$ . It was also observed that the distribution of cavitation activity influences the performance of the transfer, since it was affected by the behavior of the acoustic wave, which is a function of its acoustic parameters (wavelength and amplitude) and its physical effects (bubble coalescence, decoupling effect, bubble shielding), it being important to determine an adequate position of the sample within the acoustic bath if greater efficiency is required during the energy transfer process.

On the other hand, as the second stage of the present work, the purpose of developing a new correlation of heat transfer by convection was established, which would allow a better understanding of the cooling/heating process assisted with acoustic irradiation. Thus, under different processing parameters, a Nusselt equation ( $Nu$ ) was developed, which was obtained by assuming an apparent  $Nu$  number in the ultrasound-assisted process, expressed as the sum of the contributions of forced convection and the effects of cavitation and acoustic transmission. In addition, a conduction model was applied with a source term and the proposed correlation in accelerated heating kinetics with HIU in samples of dry-cured ham previously reported in the literature. The results showed that the validation of the developed equation of  $Nu$  achieved a satisfactory reproduction of the experimental

data and that the presence of ultrasound improves the operations that involve the transfer of energy, since there is an increase in the heat transfer coefficients and the direct absorption of ultrasonic energy by the food sample. Therefore, the theoretical results can be useful for the design of experiments and thus to be able to evaluate the ultrasonic power absorbed by the food samples and its dependence with other variables of the process.

Finally, as the last stage, with the intention of evaluating the effect that the HIU has on the freezing time, the nucleation process and the physicochemical properties of food matrices, the freezing time for the different stages of the process with and without application of the HIU was estimated and it was compared with times determined by means of analytical equations previously proposed by bibliography. On the other hand, the analysis of the nucleation stage was carried out by applying the previously developed equation and the use of experimental freezing curves at different times of ultrasonic irradiation, and finally, the possible changes that occurred on the physicochemical properties of the food matrices were evaluated by analyzing the color, texture, content and antioxidant capacity of phenolic compounds in the samples subjected to different processing conditions. Thus, the results showed that the effect of acoustic irradiation can induce an early nucleation in food samples, reducing the freezing time and affecting to a lesser extent the physicochemical properties of the samples frozen by immersion assisted with HIU. This is due to the fact that the mechanical effects of ultrasound reduce the resistance to local flow and improve the velocity of heat transfer by interrupting the boundary layer of the fluid, in addition, the cavitation bubbles generated by ultrasound, possibly acted as nuclei for crystal growth, promoting an early ice nucleation initiation.

Therefore, the present thesis work contributed to a deeper understanding of the effect and influence that the HIU has on heat transfer through a more detailed analysis of the interaction between the different variables involved in cooling and/or freezing operations. Therefore, this technology can be considered an interesting technology to intensify processes at low temperatures without greatly affecting the quality of the final product.

# ÍNDICE

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>III</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>X</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>XII</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>XIII</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>I ANTECEDENTES</b>	<b>3</b>
1.1 Congelación de los alimentos . . . . .	3
1.1.1 Etapas del proceso de congelación . . . . .	4
1.1.2 Factores que afectan la velocidad de congelación . . . . .	7
1.1.3 Métodos de congelación convencionales . . . . .	8
1.1.4 Estimación del tiempo de congelación . . . . .	11
1.1.5 Aplicación de otras tecnologías en el proceso de congelación . . . . .	15
1.2 Ultrasonido . . . . .	23
1.2.1 Generalidades . . . . .	23
1.2.2 Ultrasonido de alta intensidad . . . . .	27
1.2.2.1 Tipos de cavitación . . . . .	29
1.2.2.2 Efectos físicos y químicos de la cavitación . . . . .	30
1.2.2.3 Influencia de las características del medio sobre la intensidad ultrasonica . . . . .	31
1.2.2.4 Sistemas de generación de ultrasonido de alta intensidad . . . . .	32
1.2.2.5 Aplicación del ultrasonido de alta intensidad en la industria alimenticia . . . . .	34
1.3 Transferencia de calor en alimentos . . . . .	35

1.3.1	Ecuación de transferencia de calor . . . . .	35
1.3.2	Coefficiente de transferencia de calor convectivo . . . . .	38
<b>II</b>	<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>41</b>
<b>III</b>	<b>HIPÓTESIS Y OBJETIVOS</b>	<b>42</b>
3.1	Hipótesis . . . . .	42
3.2	Objetivo general . . . . .	42
3.3	Objetivos específicos . . . . .	42
<b>IV</b>	<b>METODOLOGÍA</b>	<b>43</b>
4.1	Plan de trabajo . . . . .	43
4.2	Montaje experimental . . . . .	46
4.2.1	Curvas de enfriamiento/calentamiento . . . . .	46
4.2.2	Curvas de congelación . . . . .	48
4.3	Determinación de la potencia ultrasónica e intensidad ultrasónica . . . . .	49
4.4	Métodos analíticos . . . . .	50
4.4.1	Color . . . . .	50
4.4.2	Firmeza . . . . .	51
4.4.3	Contenido fenólico total (CFT) . . . . .	51
4.4.4	Capacidad antioxidante (CA) . . . . .	51
4.5	Análisis estadístico . . . . .	52
<b>V</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>54</b>
5.1	Evaluación de la distribución del campo acústico y su impacto en el coeficiente de transferencia de calor por convección durante el enfriamiento asistido por ultrasonido. . . . .	54
5.1.1	Caracterización del campo acústico . . . . .	54
5.1.2	Enfriamiento asistido con ultrasonido de alta intensidad . . . . .	57
5.1.3	Determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección . . . . .	59
5.1.4	Validación del coeficiente de transferencia de calor por convección . . . . .	66
5.2	Análisis del proceso de calentamiento/enfriamiento por convección asistido por ultrasonido: desarrollo y aplicación de una ecuación de Nusselt . . . . .	69
5.2.1	Teoría . . . . .	70
5.2.1.1	Modelo de transferencia de calor . . . . .	70
5.2.1.2	Dinámica despreciable de la fase fluida . . . . .	74
5.2.1.3	Evaluación de la potencia ultrasónica absorbida por el sólido . . . . .	75

5.2.2	Desarrollo de una correlación de transferencia de calor para un proceso asistido con ultrasonido. . . . .	77
5.2.3	Desarrollo del modelo de transferencia de calor durante el calentamiento asistido con ultrasonido a tiempos cortos y temperaturas moderadas del jamón curado. . . . .	80
5.2.4	Validación de la correlación propuesta de Nusselt . . . . .	82
5.2.5	Aplicación del modelo de transferencia de calor en un proceso de calentamiento asistido con ultrasonido a tiempos cortos y temperaturas moderadas de jamón curado . . . . .	89
5.3	Efecto del UAI sobre el tiempo de congelación, inicio de la nucleación y sus propiedades fisicoquímicas . . . . .	93
5.3.1	Tiempo de congelación . . . . .	93
5.3.2	Influencia de la aplicación del ultrasonido sobre el proceso de nucleación .	97
5.3.3	Efecto de la aplicación del UAI sobre el color y textura . . . . .	100
5.3.4	Influencia de la aplicación del UAI sobre el CFT y su CA . . . . .	104
	<b>Discusiones generales</b>	<b>109</b>
	<b>Conclusiones</b>	<b>115</b>
	<b>Contribución científica</b>	<b>117</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>119</b>
	<b>Apéndice</b>	<b>132</b>
<b>A</b>	<b>Evaluación del coeficiente de transferencia de calor interno y del mecanismo dominante para la transferencia de calor</b>	<b>132</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Curva típica de congelación obtenida de un proceso de congelación por inmersión de cubos de papas. Fuente: Comandini <i>et al.</i> 2013 . . . . .	5
1.2	Clasificación de la nucleación. . . . .	5
1.3	Diagrama de fases del agua. Fuente: Wu <i>et al.</i> 2017 . . . . .	16
1.4	Impacto de la velocidad de congelación sobre la calidad final de una matriz alimenticia . . . . .	19
1.5	Escala del ultrasonido. Fuente: Corona-Jiménez, 2013 . . . . .	23
1.6	Longitud de onda y frecuencia. . . . .	26
1.7	Cavitación estable y transitoria. Adaptada en el presente trabajo. . . . .	28
1.8	Equipo de ultrasonido. Tipo baño (A) y tipo sonda (B). . . . .	33
4.1	Plan de trabajo . . . . .	45
4.2	Baño de ultrasonido de alta intensidad (37 kHz, 880 W de potencia de salida). . . .	46
4.3	Montaje experimental del enfriamiento/calentamiento y/o congelación asistida con UAI. 1.Generador de ultrasonido (37 kHz, 880 W), 2.Tina de ultrasonido de acero inoxidable, 3.Medio de inmersión, 4.Muestra, 5.Portamuestra de acero inoxidable, 6.Termopar tipo K, 7.Medidor de temperatura, 8.Sistema de refrigeración, 9.Transductores pizoeléctricos. . . . .	47
4.4	Montaje experimental para la calorimetría. 1. Baño de ultrasonido, 2. Medio de inmersión, 3. Termopar tipo K, 4. Medidor de temperatura. . . . .	50
5.1	Representación esquemática de la disposición de la esfera de cobre dentro del baño de ultrasonido: (A) vista superior y (B) vista transversal. . . . .	55
5.2	Efecto de diferentes profundidades sobre la relación de temperatura durante el enfriamiento asistido con ultrasonido de una esfera de cobre estacionaria sumergida en una solución refrigerada (0°C), para la posición 1 (A), 2 (B) y 3 (C). . . . .	58

5.3	Influencia de la intensidad ultrasónica ( $IU$ ; $W/m^2$ ) sobre la relación de mejora de la transferencia de calor ( $Er$ , %) (A) y el coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ; $W/m^2\text{°C}$ ) (B) para diferentes posiciones y profundidades por encima del área de transducción durante el enfriamiento asistido con ultrasonido de una esfera de cobre estacionaria. . . . .	61
5.4	Importancia de la longitud y amplitud de la onda ultrasónica con respecto a las profundidades por encima del área de transducción, en un instante de tiempo fijo y fenómenos de actividad de cavitación (blindaje de burbujas, efecto de desacoplamiento y coalescencia de burbujas). . . . .	65
5.5	Comparación de las curvas de enfriamiento experimental y simulada para un cilindro de cobre estacionario sumergido en un baño refrigerado a $0\text{°C}$ (A) y el ajuste de los datos experimentales con el modelo (B). Valores promedio $\pm$ desviación estándar ( $n=3$ ). . . . .	67
5.6	Comparación de las curvas de enfriamiento experimental y simulada para un cilindro de papa estacionario sumergido en un baño refrigerado a $0\text{°C}$ (A) y el ajuste de los datos experimentales con el modelo (B). Valores promedio $\pm$ desviación estándar ( $n=3$ ). . . . .	67
5.7	Montaje experimental para el estudio del proceso de enfriamiento/calentamiento convectivo asistido por ultrasonido. (1) Generador de ultrasonido, (2) Tanque de acero inoxidable, (3) Figura de cobre (esfera, cilindro y cubo), (4) Transductores, (5) Termopar tipo K, (6) Medidor de temperatura. . . . .	71
5.8	Comparación entre el número de Nusselt experimental con el ajustado a diferentes niveles de potencia ultrasónica. . . . .	84
5.9	Efecto de la potencia ultrasónica sobre el valor experimental del número de Nusselt. . . . .	85
5.10	Efecto del número de $Re$ sobre el número de $Nu$ experimental para el enfriamiento/calentamiento asistido con ultrasonido de un cubo, esfera y cilindro de cobre inmersos en agua ( $5$ a $60\text{°C}$ ) a diferentes velocidades del fluido y niveles de potencia ultrasónica. Los ajustes del 30 y 100% de potencia ultrasónica corresponde a una $IU$ de 4611 y 6913 $W/m^2$ , respectivamente. . . . .	86
5.11	Ajuste de la ecuación de correlación de transferencia de calor propuesta para el enfriamiento/calentamiento asistido con ultrasonido de un cubo, esfera y cilindro de cobre inmersos en agua. Los ajustes del 30 y 100% de potencia ultrasónica corresponden a una $IU$ de 4611 y 6914 $W/m^2$ , respectivamente. Condiciones de proceso: $5$ a $60\text{°C}$ ; $15.2 \leq Re \leq 215.2$ ; $4.3 \leq Pr \leq 8.5$ . . . . .	87

5.12	Capacidad de predicción de la correlación de transferencia de calor propuesta para el enfriamiento/calentamiento asistido con ultrasonido para una esfera y cubo de cobre inmersos en un solución de etilenglicol-agua (1: 1 V/V). Esfera: símbolos pequeños; cubo: símbolos grandes. El ajuste del 100 % de la potencia ultrasónica corresponde a una $IU$ de $4900 \text{ W/m}^2$ . Condiciones de proceso: 0 a $5^\circ\text{C}$ ; $9.1 \leq Re \leq 18.4$ ; $23.5 \leq Pr \leq 34.5$ . . . . .	88
5.13	Capacidad de predicción de la correlación de transferencia de calor propuesta para el enfriamiento/calentamiento asistido con ultrasonido para una esfera y cilindro de cobre inmersos en un solución acuosa de $\text{CaCl}_2$ (30 g/L). Esfera: símbolos grandes; cilindro: símbolos pequeños. El ajuste del 30 y 100 % de la potencia ultrasónica corresponde a una $IU$ de 600 y $2350 \text{ W/m}^2$ , respectivamente. Condiciones de proceso: $-5$ a $5^\circ\text{C}$ ; $12.9 \leq Re \leq 29.9$ ; $11.2 \leq Pr \leq 18.8$ . . . . .	88
5.14	Comparación entre los datos experimentales (símbolos) y los modelados (líneas) durante el calentamiento a tiempos cortos y temperaturas moderadas de jamón curado asistido con ultrasonido. Simulaciones realizadas asumiendo una potencia ultrasónica insignificante absorbida por el sólido, $1-f = 0$ . Caso 1: $h$ obtenido a partir de la correlación de $Nu$ (Ecuación 5.56). Caso 2: Resistencia externa insignificante a la transferencia de calor ( $h, Bi$ ). El modelo ajustado corresponde a la estimación del término de fuente de ultrasonido ( $1-f$ ) con $h$ obtenida de la correlación de $Nu$ (Ecuación 5.56). . . . .	90
5.15	Efecto de diferentes tiempos de aplicación del UAI (5, 10, 15 y 20 s) sobre el tiempo de congelación de cilindros de jicama. Cada curva mostrada corresponde al promedio de tres replicas. . . . .	98
5.16	Efecto de diferentes tiempos de aplicación del UAI (5, 10, 15 y 20 s) sobre el tiempo de congelación de cilindros de papa. Cada curva corresponde al promedio de tres replicas. . . . .	99
5.17	Posible mecanismo de nucleación del proceso de congelación por inmersión asistida con UAI de una matriz alimenticia. . . . .	100
5.18	Valores de la diferencias de color $\Delta E^*$ (Ecuación 4.4) obtenidos para la jicama (a) y papa (b) con aplicación del UAI . . . . .	103
5.19	Efecto de diferentes tiempos de aplicación del UAI sobre la firmeza de la jicama (a) y papa (b) descongelada. Medias $\pm$ intervalos LSD ( $p < 0.05$ ). . . . .	104
5.20	Correlación ( <i>Pearson</i> ) entre el CFT y su CA evaluada con ABTS (A), DPPH (B) y FRAP (C), en muestras de betabel congeladas con y sin UAI. . . . .	107

# ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Valores para <b>P</b> y <b>R</b> para diferentes geometrías. . . . .	12
1.2	Modelos existentes para la predicción del tiempo de congelación . . . . .	13
1.3	Definición de la variables para el calculo del tiempo de congelación . . . . .	15
1.4	Estudios reportados de la congelación por inmersión asistida con ultrasonido de alta intensidad en matrices alimenticias. . . . .	20
1.7	Ecuación diferencial de transferencia de calor en diferentes coordenadas geométricas.	36
1.8	Soluciones para la conducción transitoria unidimensional en una pared plana de espesor $2L$ , un cilindro de radio $r_0$ y una esfera de radio $r_0$ , sujetos a convección desde todas las superficies. . . . .	37
1.9	Ecuaciones adimensionales usadas para la estimación del número de $Nu$ , para la transferencia de calor desde una esfera y cilindro circundante. . . . .	40
4.1	Composición química de la papa, jicama y betabel . . . . .	48
5.1	Intensidad ultrasónica ( $IU$ ) y eficiencia calorimétrica ( $\eta$ en %) para diferentes posiciones y profundidades sobre la superficie del transductor durante el enfriamiento asistido con ultrasonido de una esfera de cobre estacionaria. . . . .	56
5.2	Coefficientes de transferencia de calor ( $h$ ) obtenidos a partir de una solución analítica para diferentes posiciones y profundidades durante el enfriamiento asistido con ultrasonido de una esfera de cobre estacionaria. . . . .	60
5.3	Factores y niveles evaluados. . . . .	78
5.4	Parámetros que describen el efecto de la convección forzada sobre el coeficiente de transferencia de calor. . . . .	84
5.5	Parámetros que describen el efecto del ultrasonido sobre el coeficiente de transferencia de calor. . . . .	86
5.6	Capacidad de predicción de la correlación de $Nu$ propuesta para procesos asistidos con ultrasonido en diferentes medios de inmersión. . . . .	89
5.7	Capacidad del modelo de transferencia de calor y la correlación de Nusselt propuesta para predecir el historial de temperatura durante el calentamiento a tiempos cortos y temperaturas moderadas de jamón curado asistido con ultrasonido.* . . . .	91

---

5.8	Factores y niveles evaluados . . . . .	94
5.9	Tiempos de congelación obtenidos a través una solución analítica en diferentes matrices alimenticias con y sin aplicación del ultrasonido. . . . .	95
5.10	Tiempos de congelación experimentales obtenidos para cilindros de jicama y papa con y sin aplicación del UAI. . . . .	96
5.11	Efecto de la aplicación del UAI sobre los parámetros de color (tono ( $h^\circ$ ) y croma ( $C^*$ )) y su comparación con la muestra fresca. . . . .	101
5.12	Contenido fenólico total (CFT) y capacidad antioxidante (CA) de cilindros de betabel descongelado. . . . .	105

# NOMENCLATURA

<b>a</b>	espesor total del producto en el caso de una placa infinita o el diámetro en el caso de un cilindro infinito o esfera (m)
$a^*, b^*$	coordenadas de color
<b>A</b>	área de la superficie sólida (m <sup>2</sup> )
$A_s$	área a través de la cual se transfiere el calor (m <sup>2</sup> )
<b>A, B, C, D, E</b>	parámetros para la ecuación de $Nu$
$a, b, c, d, e$	parámetros para la ecuación de $Nu$
<b>Bi</b>	número adimensional de Biot
$Bi_1, Bi_s$	número de Bi: etapa de enfriamiento y cambio de fase, respectivamente
<b>c</b>	velocidad de la onda (m/s)
<b>C*</b>	croma
$C_1, C_s$	capacidad calorífica volumétrica, antes del punto inicial de congelación y por debajo de éste (J/m <sup>3</sup> °C)
<b>Cp</b>	calor específico (J/kg°C)
$Cp_u$	calor específico del producto descongelado (J/kg°C)
$Cp_l$	calor específico del producto congelado (J/kg°C)
<b>E</b>	Factor de forma para la ecuación de Cleand y Earle
<b>E</b>	densidad de energía (J/m <sup>3</sup> )
$E_t$	potencia eléctrica suministrada (W)
$E_r$	mejora de transferencia de calor (%)
$E_f$	factor de mejora de la transferencia de calor
<b>E*</b>	color
<b>f</b>	fracción de la potencia US absorbida por el fluido
$F_0$	número adimensional de Fourier
<b>F</b>	flujo (m <sup>3</sup> /s)
$f_r$	frecuencia (MHz)
$G_j$	función de transferencia ( $j = 1, 2, 3, 4$ )
<b>h</b>	coeficiente de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> °C)
$h^\circ$	tono
<b>H</b>	Entalpía (kJ/kg)
<b>HTI</b>	incremento de la transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> °C)
<b>IU</b>	intensidad ultrasónica (W/m <sup>2</sup> )

---

$J_0, J_1$	funciones de Bessel de cero y primer orden, respectivamente
$k$	conductividad térmica (W/m°C)
$k_f$	conductividad térmica del producto congelado (W/m°C)
$K_j$	ganancia del proceso ( $j = 11, 12, 13, 21, 22$ )
$L$	longitud característica para la conducción (m)
$L_c$	longitud característica para la convección (m)
$L^*$	luminosidad
$L_f$	calor latente de fusión volumétrico ( J/m <sup>3</sup> )
$M_j$	magnitud de la entrada escalonada ( $j = 1, 2, 3$ )
$Nu$	número adimensional de Nusselt
$N_{PK}$	número adimensional de Planck
$N_{Ste}$	número adimensional de Stefan
$P$	potencia (W)
$P_A$	presión acústica (atm)
$Pr$	número adimensional de Prandtl
<b>P, R</b>	parámetros de forma
$Q$	calor irradiado por el US (W/m <sup>2</sup> )
$Q_i$	Calor (J)
$r$	coordenada radial (m)
$R$	relación entre el efecto de convección y la irradiación del US que conduce a un aumento de temperatura en el sólido
$Re$	número adimensional de Reynolds
$S$	superficie del recipiente (m <sup>2</sup> )
$t$	tiempo (s)
$t_f$	tiempo de congelación (s)
$t_1$	tiempo de enfriamiento (s)
$t_2$	tiempo de cambio de fase (s)
$t_3$	tiempo de subenfriamiento o templado (s)
$T, T_m$	Temperature: local y promedio, respectivamente (°C)
$T_i$	temperatura inicial del alimento (°C)
$T_f$	temperatura inicial de congelación (°C)
$T_1$	temperatura del medio de congelación (°C)
$T_a$	temperatura del medio (°C)
$T_c$	temperatura en el centro geométrico (°C)

$T_b$	temperatura media final ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{fm}$	temperatura de congelación media ( $^{\circ}\text{C}$ )
$U$	coeficiente global de transferencia de calor ( $\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ )
$V$	volumen ( $\text{m}^3$ )
$v$	velocidad ( $\text{m}/\text{s}$ )
$v_a$	velocidad acústica ( $\text{m}/\text{s}$ )
$x$	variable promediada ( $\text{m}$ )
$X$	indica una entrada arbitraria
$Y$	indica una respuesta arbitraria
$z$	coordenada axial ( $\text{m}$ )

**Símbolos griegos**

$\alpha$	difusividad térmica ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$\varepsilon$	fracción de volumen ocupada por el fluido
$\eta$	eficiencia calorimétrica (%)
$\mu$	viscosidad ( $\text{kg}/\text{m s}$ )
$\theta$	temperatura circundante ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\theta^*$	temperatura adimensional
$\Theta_0, \Theta_1$	temperatura del fluido de entrada y salida, respectivamente ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\rho$	densidad ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_f$	densidad del producto congelado ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\sigma$	superficie del área de transducción ( $\text{m}^2$ )
$\tau_j$	tiempo constante ( $j = 1, 2$ )
$\lambda_v$	calor latente de fusión y/o congelación ( $\text{kJ}/\text{kg}$ )
$\lambda$	longitud de onda ( $\text{m}$ )
$\lambda_n$	valor propio de una solución
$\Delta$	diferencia

**Subscripts**

$app$	aparente
$av$	promedio
$i$	denota la interfaz sólido-fluido
$ref$	referencia ( $-10^{\circ}\text{C}$ )
$s$	denota el sólido
$ss$	denota la solución de estado estacionario
$US$	para el proceso asistido por ultrasonido
$0$	denota un estado inicial
$0, 1$	denota la corriente de entrada y salida, respectivamente
$\infty$	denota el fluido

# INTRODUCCIÓN

El fenómeno de transferencia de calor se encuentra presente en diferentes operaciones del área de la Ingeniería Química. De forma particular, dentro de la ingeniería de alimentos, éste fenómeno gobierna a procesos de enfriamiento y/o congelación de los alimentos, por lo que son considerados los métodos más utilizados para la conservación a mediano y largo plazo de los productos alimenticios perecederos, debido a que son capaces de preservar las características de calidad e inocuidad de éstos. No obstante, estas operaciones pueden generar cambios en los alimentos debido a la posible formación de grandes cristales de hielo los cuales pueden causar un daño mecánico resultando en una baja calidad del producto (Islam *et al.*, 2015), por lo que el tamaño y distribución de los cristales de hielo, que a su vez dependen en gran medida del tiempo y velocidad de congelación (Petzold & Aguilera, 2009), son parámetros fundamentales que deben ser controlados durante el proceso para la obtención de un adecuado producto final.

Recientemente, se han implementado nuevas tecnologías para controlar estas operaciones, dentro de las cuales se incluyen el uso de la alta presión, microondas, campo eléctrico y ultrasonido (Dalvi-Isfahan *et al.*, 2017; Qiu *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2017; Xanthakis *et al.*, 2014). Este último ha resultado ser una tecnología de procesamiento de alimentos no térmica que ha sido reconocida como una herramienta eficaz, tanto para intensificar la transferencia de calor en procesos de enfriamiento, como en la inducción del fenómeno de nucleación en procesos de congelación de diferentes alimentos (Comandini *et al.*, 2013; Kiani & Sun, 2016; Sun *et al.*, 2019; Zhu *et al.*, 2018). Los ultrasonidos son ondas acústicas cuya frecuencia es más alta que el límite de audición del ser humano (>20 kHz). Cuando estas ondas se propagan en un medio líquido se producen fenómenos acústicos como la cavitación y la transmisión acústica (Bulliard-Sauret *et al.*, 2019; Cheng *et al.*, 2015; Rastogi, 2011) los cuales intensifican y mejoran la velocidad de la transferencia (Legay *et al.*, 2011; Nomura *et al.*, 2002).

Diferentes trabajos han evaluado la presencia del ultrasonido en procesos de congelación de diferentes matrices alimenticias, algunos de ellos han estudiado el efecto acústico sobre los cambios nutrimentales y de calidad de los alimentos, mientras que otros lo han hecho desde el punto de vista del efecto que tiene sobre el fenómeno de transporte de calor, siendo estos últimos en menor cantidad. Es así como se han estudiado los cambios en las características de firmeza y estructura de algunos alimentos, observando que la eficacia del ultrasonido es mejor en alimentos con estructuras densas o muy definidas, además de que han deducido que la presencia de la irradiación acústica en estas estructuras mejora la velocidad de operación, reduciendo los tiempos de procesamiento en comparación con una tecnología convencional (Cheng *et al.*, 2014; Comandini *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2019; Xin *et al.*, 2014a,1; Xu *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2018). Por otro lado, el entendimien-

to del efecto acústico sobre el fenómeno de transferencia de calor ha sido previamente evaluado, reportando que diferentes parámetros y propiedades termofísicas del sistema de operación de enfriamiento y/o congelación tienen un efecto significativo sobre la eficacia del ultrasonido y por lo tanto sobre la transferencia de calor. Es así como se han realizado estudios que evalúan, mediante el uso de herramientas matemáticas como correlaciones empíricas, el efecto que tienen dichas condiciones de operación y propiedades sobre la transferencia de calor, sin embargo, solo se han desarrollado pocas correlaciones que incorporen las propiedades acústicas y evalúen realmente su efecto (Cai *et al.*, 2010; Kiani *et al.*, 2013a).

A pesar de que existen trabajos que relacionan la presencia del ultrasonido con la transferencia de calor y sus efectos físicos, todavía no ha sido estudiado a profundidad la eficacia del ultrasonido en función de la combinación de las variables de proceso, tanto del fenómeno de transporte como las acústicas, por lo que el desarrollo de aplicaciones adicionales para la irradiación ultrasónica en procesos de transferencia de calor está profundamente ligado al entendimiento y comprensión de las relaciones funcionales existentes entre las variables del proceso y la creación de nuevos protocolos experimentales para lograr estas tareas. Lo anterior sería de gran utilidad para analizar el efecto de la irradiación con ultrasonido para el diseño y optimización de procesos asistidos con UAI.

# I. ANTECEDENTES

## 1.1. Congelación de los alimentos

El proceso de congelación desde el punto de vista de la ingeniería es un fenómeno de transferencia de calor en estado inestable, con cambio de fase líquido-sólido, en el que un material o producto pierde calor por convección a través de su superficie y por conducción en su interior (Rahman, 2009). La congelación de los alimentos por lo tanto, es una forma de conservación que se basa en la solidificación del agua contenida en éstos, mediante la aplicación intensa de frío, con el propósito de detener los procesos bacteriológicos y enzimáticos que alteran a los alimentos. Dentro de la industria alimenticia, el método de congelación es de los más utilizados para la preservación a largo plazo de productos perecederos, debido a que las características sensoriales del alimento y su valor nutritivo se afectan de manera reducida con el paso del tiempo (Alzate, 2003). Lo anterior se debe a que las reacciones bioquímicas y físico-químicas, las cuales son responsables de las pérdidas de nutrientes, cambios indeseables de color, textura y desarrollo de mal sabor, ocurren de forma más lenta durante el almacenamiento del producto congelado. Por otro lado, la formación de cristales de hielo durante el proceso de congelación dentro del producto cambia la disponibilidad de agua para participar en éstas reacciones (Qiu *et al.*, 2020). A medida que se reduce la temperatura y parte del agua se transforma en hielo, la actividad de agua ( $a_w$ ) disminuye en el alimento, la cual influye directamente en el crecimiento de los microorganismos, ya que estos no pueden desarrollarse en condiciones de baja  $a_w$  (Ibarz & Barbosa-Cánovas, 2002; Singh & Heldman, 2001).

No obstante, aunque la congelación ha demostrado ser una técnica eficaz para la conservación a largo plazo de productos perecederos, la eficiencia de este método se ve afectada por factores internos y externos; entre los factores internos se encuentra la composición de los alimentos la cual incluye el contenido de agua (ligada y libre) y los sólidos solubles e insolubles presentes en el alimento; las propiedades termo-físicas (densidad, calor específico y conductividad térmica) de los alimentos y las difusividades térmicas y de masa son otros factores internos importantes (Rahman, 2009). En cuanto los factores externos, los cuales están relacionados con las condiciones físicas en las que se lleva a cabo el proceso de congelación, se encuentra el tipo de equipo de congelación utilizado, el valor del coeficiente de transferencia de calor y masa y la velocidad de congelación.

Este último factor tiene una influencia significativa sobre la calidad final del producto terminado. A bajas velocidades de congelación se forman pocos y grandes cristales de hielo, los cuales al descongelarse provocan la ruptura de tejidos celulares, presentando un exudado acuoso como indicio. A una alta velocidad, un gran número de cristales de hielo de tamaño pequeño se forman, evitando de esta manera la ruptura de la estructura celular del alimento (Cheng *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2018).

En las siguientes sub-secciones se describen las etapas en las que ocurre el proceso de congelación así como algunos factores que pueden afectar la velocidad de congelación.

### 1.1.1. Etapas del proceso de congelación

El proceso de congelación en los alimentos es más complejo que la congelación del agua pura. Los alimentos al contener otros solutos disueltos además de agua, presentan un comportamiento ante la congelación similar al de las soluciones (Barreiro & Sandoval, 2006). La evolución de la temperatura con el tiempo durante el proceso de congelación es denominada curva de congelación. La curva de congelación es uno de los métodos más utilizados para determinar el punto de congelación y otros parámetros de congelación de los alimentos (Rahman *et al.*, 2002), debido a su uso fácil y económico. En la Figura 1.1 se muestra una típica curva de congelación obtenida de un proceso de congelación por inmersión de cubos de papa, la cual consta de tres etapas principales (Comandini *et al.*, 2013; Dalvi-Isfahan *et al.*, 2017; Velázquez Rodríguez, 2014):

- **Etapas de enfriamiento o refrigeración:** En esta etapa el alimento se enfría desde su temperatura inicial (que generalmente es mayor que 0°C), hasta la temperatura de inicio de nucleación (NT), la cual es la temperatura más baja alcanzada por la muestra, durante ésta etapa sin formación de hielo, en esta etapa sólo se elimina el calor sensible del alimento.
- **Etapas de cambio de fase:** Esta etapa se caracteriza por el inicio de la nucleación y el crecimiento de cristales de hielo. La diferencia negativa entre la NT y la temperatura de congelación inicial (IFT) se denomina grado de sobreenfriamiento, después de cierto grado de sobreenfriamiento las dimensiones del núcleo cristalino exceden su radio crítico y el proceso de enfriamiento se detiene provocando una nucleación repentina de los cristales de agua por la pérdida de calor sensible de las moléculas de ésta (generando así un pico en la curva de congelación). El tamaño de los cristales dependerá de la velocidad de transferencia de calor. Una vez que se alcanza el punto de congelación no se observa variación de temperatura, retirándose gradualmente el calor latente de fusión, es decir, se produce gradualmente un cambio de estado. La mayoría de los alimentos están constituidos por una matriz de sólidos insolubles y una fase acuosa que contiene una cierta cantidad de sólidos disueltos; debido a estos sólidos la congelación del agua no se produce a 0°C, sino que el cambio de fase comienza a una temperatura menor (Freixedas *et al.*, 2000; Kaale & Eikevik, 2014).
- **Etapas de subenfriamiento o templado:** En esta etapa una vez alcanzada la conversión total de agua en hielo, nuevamente inicia un gradual descenso de temperatura. Si bien no existen limitaciones para seleccionar la temperatura final, los dos valores más utilizados en la práctica son de -10 y -18°C.

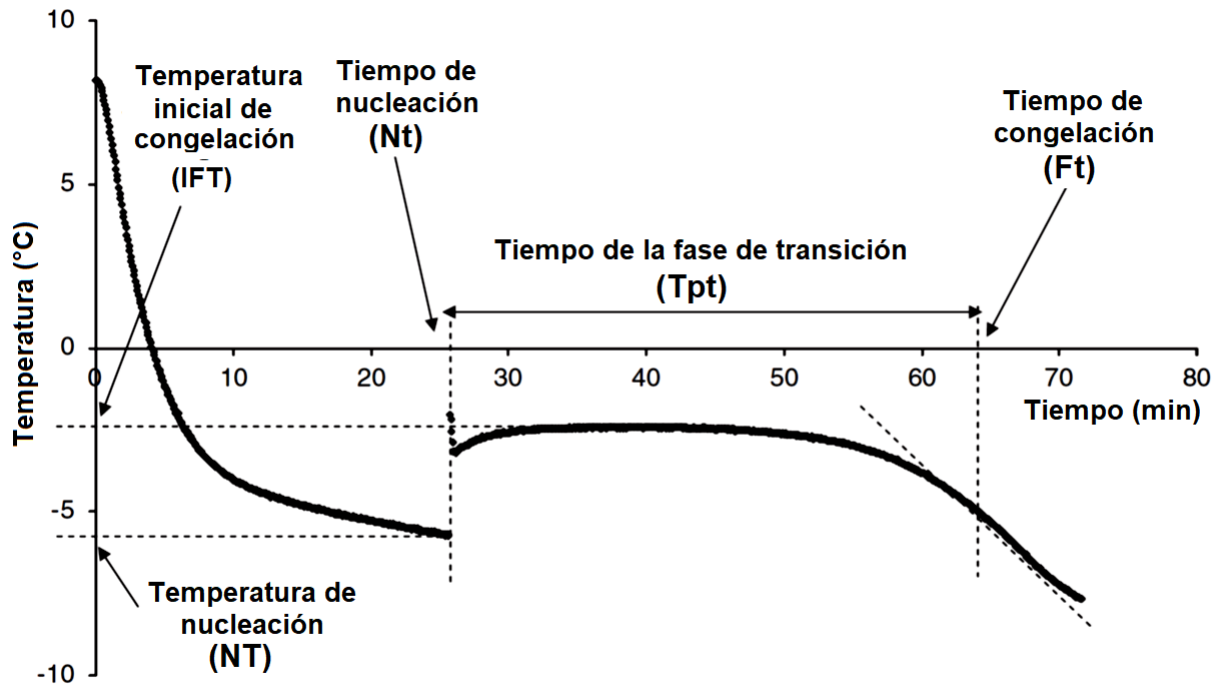


Figura 1.1. Curva típica de congelación obtenida de un proceso de congelación por inmersión de cubos de papas. Fuente: Comandini *et al.* 2013

Como se mencionó anteriormente, la nucleación es el primer paso en la formación de hielo y afecta de forma crítica el tamaño y forma del cristal durante la cristalización. La nucleación comienza cuando una cantidad adecuada de moléculas se asocian en tres dimensiones para formar un núcleo crítico, el cual proporciona una superficie adecuada para el crecimiento cristalino (en la nucleación se libera el calor latente de fusión). Durante la nucleación de cristales se identifican dos procesos distintos, la nucleación primaria y la nucleación secundaria (Figura 1.2):

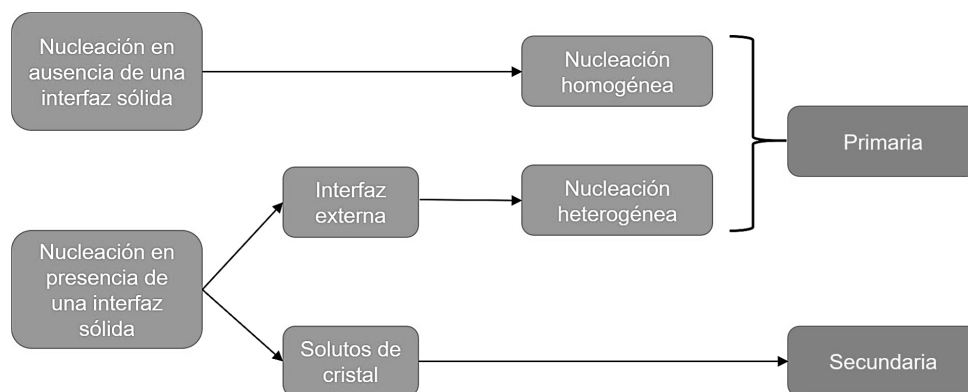


Figura 1.2. Clasificación de la nucleación.

- La nucleación primaria implica la formación de un cristal en una solución que no contiene cristales existentes. A su vez, la nucleación primaria se clasifica en homogénea y heterogénea (Sahagian & Goff, 1996; Zhao & Takhar, 2017), siendo la primera aquella que se produce espontáneamente, sin un sitio de nucleación preferencial. La nucleación homogénea se puede observar en un sistema puro; por ejemplo, el agua pura se congela a  $-42^{\circ}\text{C}$  en lugar de  $0^{\circ}\text{C}$  (punto natural de congelación del agua). Por lo tanto, el agua pura puede permanecer subenfriada como un líquido y eventualmente exhibe una nucleación homogénea. Para el caso de la nucleación heterogénea se produce debido a la presencia de algunas impurezas o componentes diferentes en una solución, tales como productos bioquímicos, almidón y cuerpos proteicos, los cuales forman superficies estables para la formación de núcleos. En los sistemas alimenticios, la nucleación es principalmente heterogénea debido a la presencia de impurezas.
- La nucleación secundaria implica la producción de nuevos cristales en una solución que contiene cristales preexistentes, ésta puede ocurrir ya sea, por los cristales que actúan como plantillas para formar nuevos núcleos de cristales o por fragmentación de los cristales para producir más sitios de nucleación (Delgado & Sun, 2011).

Por otro lado, la probabilidad de nucleación depende del volumen de la muestra. Cuando el volumen de la muestra es pequeño, la probabilidad de nucleación es baja y se requieren de temperaturas de congelación muy bajas. La velocidad de nucleación depende en gran medida de la temperatura del medio de congelación, el subenfriamiento y la viscosidad del líquido. El subenfriamiento inicial alto aumenta la velocidad de nucleación (Fikiin, 2007). Por último, el crecimiento cristalino ocurre inmediatamente después de la nucleación, éste proceso se rige por la difusión de partículas a la superficie de los núcleos críticos y su acoplamiento ordenado sobre el cristal en crecimiento. El crecimiento no es instantáneo y está controlado por la velocidad de eliminación de calor latente liberado durante el cambio de fase, así como también por la velocidad de transferencia de masa en el caso de soluciones (Zhang *et al.*, 2015).

El tamaño del cristal varía inversamente con el número de núcleos formados. A altas velocidades de congelación, se forma un gran número de núcleos y la masa de hielo se distribuye en un gran número de pequeños cristales. A bajas velocidades de congelación se forman un número menor de núcleos, lo cual provoca la formación de grandes de cristales de hielo. Por lo tanto, los alimentos congelados rápidamente presentan pequeños y numerosos cristales de hielo. No obstante, alimentos congelados a la misma velocidad de congelación y con las mismas dimensiones, presentan diferentes tamaños de cristales, debido a la cantidad de agua libre disponible en cada uno de ellos (Fikiin, 2007).

### 1.1.2. Factores que afectan la velocidad de congelación

Con el fin de mantener una alta calidad de los alimentos congelados, una alta velocidad de congelación es deseable, debido a que ésta determina el tamaño de los cristales de hielo; cuanto más rápida sea la velocidad, mayor será la nucleación y se producirá un mayor número de cristales de menor tamaño. Sin embargo, algunos factores afectan la velocidad de congelación, entre ellos las propiedades termo-físicas del alimento, la diferencia de temperatura entre el medio de congelación y el alimento, forma y tamaño del alimento y el coeficiente de transferencia de calor por convección.

- **Propiedades termo-físicas de los alimentos.** Como ya se había mencionado anteriormente, el proceso de congelación se basa en la solidificación del agua contenida en los alimentos. Por ello, uno de los factores más importantes en el proceso de congelación es el contenido de agua del producto y/o alimento. A medida que el agua dentro del alimento cambia de líquido a sólido, las propiedades termo-físicas (densidad, conductividad térmica y calor específico) de los alimentos, cambian gradualmente a medida que la temperatura desciende por debajo del punto de congelación del agua en los alimentos. La conductividad térmica ( $k$ ) es la propiedad más influyente sobre la velocidad de congelación, debido a que ésta varía con el cambio de fase. El valor de la  $k$  para el hielo es casi cuatro veces mayor que el del agua en estado líquido. Por otro lado, la conductividad térmica también se ve afectada por la dirección de las fibras de los alimentos, ya que la transferencia de calor es más rápida a lo largo de la dirección de las fibras de los alimentos que a través de ellas, por lo tanto, la diferencia en la  $k$  en paralelo y perpendicular a las fibras de los alimentos deben tenerse en cuenta en la evaluación de la velocidad de congelación (Zhu & Sun, 2001). Además de la  $k$ , la densidad ( $\rho$ ) del alimento cambia significativamente durante la congelación, el cambio gradual en la densidad del alimento se debe al cambio en la proporción de agua líquida a agua congelada; la magnitud del cambio de densidad es proporcional al contenido de humedad del producto. De esta manera la densidad del agua congelada es menor que la del agua en estado líquido (a 0°C el agua tiene una densidad de 999.8 Kg/m<sup>3</sup> y esta se reduce alrededor de 920 kg/m<sup>3</sup> cuando el agua se encuentra congelada). Sin embargo, estos cambios de densidad son relativamente pequeños (la reducción es del orden del 10-15%) por lo que la influencia de los cambios de densidad en la velocidad de congelación no es significativa. En cuanto al calor específico el cual se define como la cantidad de calor que se necesita por unidad de masa para elevar la temperatura un grado centígrado; el valor de éste a una temperatura por encima del punto inicial de congelación del alimento es mucho menor que el que se encuentra por debajo de su punto de congelación. Durante el proceso de congelación, tanto el calor sensible como el latente deben ser eliminados, el calor latente es liberado en un intervalo de temperaturas (Fikiin, 2007). De forma general las propiedades termo-físicas de los alimentos gobiernan la

velocidad de transferencia y remoción de calor; el control de los factores que promueven las condiciones óptimas para el cambio de estado del agua es fundamental para el control de la operación de congelación.

- **Diferencia de temperatura entre el medio de congelación y el alimento.** La diferencia de temperatura entre el medio de congelación y el alimento es la fuerza motriz para la eliminación del calor. Si se baja la temperatura de congelación, la velocidad de congelación aumentará siempre. Por lo tanto, bajar la temperatura de congelación es un método para acelerar el proceso de congelación.
- **Forma y tamaño del alimento.** La forma y tamaño del alimento afecta significativamente la velocidad de congelación. Para alimentos de forma regular, el lugar en donde cambia más lentamente la temperatura es en su centro geométrico, por lo cual, los cristales de hielo crecen más grandes en su centro geométrico. Para obtener una congelación rápida, los alimentos de tamaño pequeño son los más adecuados. En ocasiones no es factible cambiar las dimensiones de los alimentos, sin embargo, es posible disponer de estos en una sola capa en lugar de múltiples capas de gran grosor, para así mejorar la transferencia de calor. En cuanto a la forma de los productos alimenticios, si el espesor de una placa infinita, el diámetro de un cilindro infinito y diámetro de una esfera tienen el mismo valor, y esos tres elementos están expuestos a las mismas condiciones de congelación, sus tiempos de congelación se calculan aproximadamente en las siguientes proporciones: 6:3:2, lo que significa que una esfera se congelará en dos tercios de tiempo que un cilindro y en una tercera parte del tiempo de una placa (Becker & Fricke, 1999; Delgado & Sun, 2001).
- **Coefficiente de transferencia de calor.** Si el coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ) es alto, se puede transferir más calor. El valor de  $h$  se ve afectado por factores tales como, el medio de congelación, el flujo, envase del alimento, el tamaño y distribución del alimento, entre otros. Para obtener un alto valor de  $h$ , se requiere una alta velocidad del medio de congelación o flujo. Por otro lado, si el alimento se encuentra envasado, este proporciona una resistencia a la transferencia de calor del alimento al medio de congelación (Tocci & Mascheroni, 1995). Por lo tanto, para obtener una alta velocidad de congelación, el alimento debe envasarse después de la congelación.

### 1.1.3. Métodos de congelación convencionales

Actualmente el proceso de congelación de los alimentos a nivel industrial se lleva a cabo mediante técnicas de congelación convencionales, tales como la congelación por contacto, la congelación por chorro de aire, la congelación criogénica y la congelación por inmersión, entre otras. Algunas

de ellas pueden llegar a ser lentas debido a las bajas conductividades térmicas de los alimentos (0.5 a 1.5 W/m°C), no obstante, continúan siendo ampliamente utilizadas, la velocidad de congelación de estos métodos se logra controlando el coeficiente de transferencia de calor convectivo el cual se encuentra dentro de un rango de 5-2000 W/m<sup>2</sup>°C (Cheng *et al.*, 2017; Muthukumarappan *et al.*, 2019; Rahman, 2009).

- **Congelación por contacto y/o placas.** Este equipo está conformado por una serie de placas de aluminio huecas y paralelas a través de las cuales circula un refrigerante (hasta -40°C). Las muestras alimenticias se intercalan entre las placas y se aplica presión para inducir un buen contacto con el alimento, de esta manera el producto alimenticio se congela mientras se mantiene entre dos placas refrigeradas. Los sistemas de congelación de placas se pueden operar por lotes y en un sistema continuo; para el sistema por lotes el producto se coloca entre las placas durante un tiempo de residencia específico, por lo tanto el tiempo de congelación es el tiempo de residencia, el cual representa el tiempo total requerido para cambiar la temperatura inicial de un producto hasta una temperatura final deseada. Por otro lado, en un sistema de congelación por placas continuo, las placas se mueven sosteniendo el producto, éste se mantiene entre las placas refrigeradas durante todo el proceso de congelación. Para este sistema el tiempo de congelación, es el tiempo total requerido para que el producto se mueva de la entrada a la salida. El principal mecanismo de transferencia de calor es la conducción, el congelador de placas es un método muy eficaz para la congelación de alimentos con velocidades de congelación relativamente altas de transferencia de calor. Sin embargo, las principales desventajas de este método de congelación es que se limita a alimentos planos (en forma de placa), así como también su alto costo de operación, especialmente si es un proceso automatizado para funcionar de forma continua (Singh & Heldman, 2001; Smith, 2003).
- **Congelación por chorro de aire.** En este método la temperatura del alimento se reduce con la aplicación de aire frío a una velocidad relativamente alta (2.5 a 5 m/s), el aire aplicado previamente se ha enfriado por contacto indirecto con un refrigerante en un intercambiador de calor. Al igual que la congelación por placas, este tipo de congeladores pueden operar por lotes o en modo continuo. El sistema por lotes consiste en una carga y descarga manual del producto y en el modo continuo, el producto se traslada en un transportador que se mueve a través de una corriente de aire a una alta velocidad, en este caso la longitud y la velocidad del transportador establecen el tiempo de residencia del producto y a su vez el tiempo de congelación. La gran ventaja de este tipo de sistema de congelación es su capacidad para congelar alimentos de diversas formas y tamaños, por lo cual es más versátil que el congelador de placas. Sin embargo, una baja velocidad de aire da como resultado una congelación lenta del

alimento y/o producto y las velocidades más altas aumentan considerablemente los costos de congelación (Rahman, 2009).

- **Congelación criogénica.** Durante la congelación criogénica el producto alimenticio se pone en contacto directo con un refrigerante líquido, el más utilizado es el nitrógeno líquido (punto de ebullición  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), pero también es común utilizar dióxido de carbono sólido (punto de ebullición  $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). La congelación criogénica puede llevarse a través de un sistema de túnel o un sistema giratorio. En el caso del túnel, los alimentos se transportan en una cinta a través de un túnel aislado, en donde el alimento pasa a través de una región en la que el gas nitrógeno frío ( $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) circula a una alta velocidad, después el alimento es transportado a los cabezales rociadores, donde el nitrógeno líquido se rocía directamente sobre la superficie del alimento. No es recomendable sumergir el alimento en el refrigerante líquido debido al efecto del riesgo del choque térmico el cual puede producir presiones internas dentro del alimento provocando una inadecuada calidad final del alimento (deformación). El sistema giratorio consiste en un tambor largo y hueco, el cual se encuentra ligeramente inclinado, en el cual los alimentos caen a través de una cortina de gas y líquido de refrigerante, dicho equipo puede tener hasta 1.5 m de diámetro y 10 m de longitud. Este tipo de congeladores son flexibles al poder procesar y/congelar diferentes tipos de alimentos (formas). Los equipos utilizados para la congelación criogénica son fáciles de utilizar y en ellos se obtiene una congelación rápida del alimento (tiempos cortos de congelación), por lo tanto la rápida formación de pequeños cristales de hielo reduce en gran medida el daño causado por la ruptura celular, preservando el color, la textura, el sabor y el valor nutricional. Sin embargo, la principal desventaja de este método de congelación es el alto costo del refrigerante. Es posible que se requiera una cantidad de nitrógeno líquido hasta tres veces la masa de los alimentos que se van a congelar. Por lo tanto, este tipo de congelación se usa para productos de alto valor debido al alto costo de capital para la compresión de gas (Rahman, 2009; Singh & Heldman, 2001; Smith, 2003).
- **Congelación por inmersión.** Este método, implica un contacto directo entre el producto alimenticio y un líquido y/o refrigerante a baja temperatura que posea un punto de congelación bajo; el refrigerante por lo general se selecciona en función de sus propiedades termo-físicas y de seguridad. Durante la inmersión, ocurre la transferencia simultánea de energía y materia. El movimiento de agua proveniente del alimento hacia la solución de inmersión y el movimiento de soluto desde el líquido refrigerante hacia el interior del alimento (Lucas *et al.*, 1999). Uno de los refrigerantes más utilizados es la salmuera (con temperaturas de hasta  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), no obstante, el alimento debe estar envasado para evitar que éste adquiera un sabor salado, además de que el material de construcción del equipo debe ser anticorrosivo. Otro tipo de refrigerantes líquidos utilizados son el glicerol, glicol y soluciones acuosas de clo-

ruro de calcio. Este tipo de congelación permite congelar alimentos con formas irregulares, así como también, permite obtener un alto coeficiente de transferencia de calor (hasta 1000 W/m<sup>2</sup>°C), por lo tanto el proceso de congelación puede ocurrir a una alta velocidad.

#### 1.1.4. Estimación del tiempo de congelación

La estimación del tiempo de congelación es uno de los parámetros más importantes dentro del diseño de un proceso de congelación, debido a que este representa el tiempo en que el alimento estará dentro del equipo de congelación (el tiempo que necesita el centro geométrico del alimento para cambiar su temperatura inicial hasta una temperatura final determinada, la cual es inferior a su temperatura de congelación). En la literatura se han reportado una serie de modelos para predecir el tiempo de congelación, sin embargo, durante el mismo ocurre un cambio de fase, por lo cual la mayoría de las soluciones no son adecuadas. La congelación de los alimentos presenta un problema complejo que involucra varios fenómenos físicos simultáneos como lo son la transferencia de calor, transferencia masa, nucleación, crecimiento cristalino, entre otros. La predicción del tiempo de congelación de los alimentos y los fenómenos asociados a éste plantea un desafío especial, debido a que alrededor del punto de congelación, existen grandes y repentinas variaciones en las propiedades termo-físicas de los alimentos. Esto conduce a una ecuación diferencial parcial no lineal, la cual es difícil de resolver. Los investigadores, que han encontrado una solución, han utilizado métodos numéricos finitos de diferencia o de elementos finitos. Por lo tanto, los modelos para predecir los tiempos de congelación van desde soluciones analíticas aproximadas hasta métodos numéricos más complejos (Mittal, 2011; Pham, 2006).

##### Ecuación de Plank

La etapa de congelación comienza cuando la temperatura de los alimentos ha alcanzado su punto de congelación. El cambio de fase se produce en esta etapa, que implica la eliminación del calor latente. Los métodos más simples para predecir el tiempo de congelación están generalmente relacionados con la ecuación de Plank (Ecuación 1.1) (Heldman & Taylor, 1997), la cual es una de las ecuaciones más utilizadas para predecir el tiempo de congelación así como también es una de las más fáciles de usar.

$$t_{Plank} = \frac{\lambda_v \rho_f}{(T_f - T_1)} \left( \frac{Pa}{h} + \frac{Ra^2}{k_f} \right) \quad (1.1)$$

La ecuación de Plank indica que el tiempo de congelación esta en función de dos grupos de factores, un grupo está relacionado con el producto (o alimento); el calor latente de fusión ( $\lambda_v$ , kJ/kg), la densidad ( $\rho_f$ , kg/m<sup>3</sup>) y la conductividad térmica del producto congelado ( $k_f$ , W/m°C). Además, para obtener una solución analítica, la forma adimensional de la ecuación de Plank, se resuelve

para predecir el tiempo de congelación de un producto con geometría simple, tal como una placa infinita, cilindro infinito y esfera. La dimensión del producto también pertenece a este grupo, el cual está definido por el espesor total en el caso de una placa infinita o el diámetro en el caso de un cilindro infinito o esfera ( $a$ , m) y a los parámetros de forma  $\mathbf{P}$  y  $\mathbf{R}$  (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Valores para  $\mathbf{P}$  y  $\mathbf{R}$  para diferentes geometrías.

Forma geométrica	$\mathbf{P}$	$\mathbf{R}$
Placa infinita	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{8}$
Cilindro infinito	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{16}$
Esfera	$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{24}$

El segundo grupo está relacionado con el proceso que implica la diferencia de la temperatura inicial de congelación del alimento y/o producto y la temperatura del medio de congelación ( $T_f - T_1$ , °C) y el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ , W/m<sup>2</sup>°C).

Varios investigadores han observado que la ecuación de Plank presenta algunas limitaciones (Delgado & Sun, 2001; Salvadori & Mascheroni, 1991; Zhao & Takhar, 2017), ya que ésta no predice con precisión los tiempos de congelación de los alimentos, esto es debido a que el método de Plank asume que la congelación de los alimentos se lleva a cabo a temperatura constante y no a un rango de temperaturas; además supone que la conductividad térmica es constante, pero en realidad ésta varía considerablemente durante el proceso de congelación. Otra limitación importante es que no considera la eliminación del calor sensible por encima del punto de congelación.

A partir de la ecuación de Planck (Ecuación 1.1) diversas modificaciones han sido realizadas, con el propósito de mejorar su precisión, en la Tabla 1.2 se muestran algunas de los modelos desarrollados a partir de la ecuación de Plank para la predicción del tiempo de congelación de matrices alimenticias.

Tabla 1.2. Modelos existentes para la predicción del tiempo de congelación

Autor	Ecuación	Consideraciones
Nagaoka <i>et al.</i> (1955)	$t_f = \frac{\Delta H \rho_f}{T_f - T_1} \left[ \frac{Pa}{h} + \frac{Pa^2}{k_f} \right] (1 + 0.008T_i)$ $\Delta H = [Cp_u(T_i - T_f) + \lambda_v + Cp_l(T_f - T)]$	<p>La ecuación de Nagaoka considera el calor sensible por encima del punto de congelación inicial y asume que todo el calor latente se elimina a temperatura constante.</p>
Cleland & Earle (1984)	$t_f = \frac{\rho \Delta H_{ref}}{E(T_f - T_1)} \left[ \frac{Pa}{h} + \frac{Ra^2}{k_f} \right] \left( 1 - \frac{1.65 N_{Ste}}{k_f} \ln \left[ \frac{T - T_1}{T_{ref} - T_1} \right] \right)$ $N_{PK} = \frac{Cp_u(T_i - T_f)}{\Delta H_{ref}} \text{ y } N_{Ste} = \frac{Cp_l(T_f - T_m)}{\Delta H_{ref}}$ $\mathbf{P} = 0.5 [1.026 + 0.5808 N_{PK} + N_{Ste} (0.2296 N_{PK} + 0.105)]$ $\mathbf{R} = 0.125 [1.202 + N_{Ste} (3.410 N_{PK} 0.7336)]$	<p>La ecuación de Cleand y Earle considera la eliminación del calor sensible por encima y por debajo del punto de congelación inicial del alimento, así como la variación de la temperatura durante el proceso de congelación.</p>
Pham (1986)	$t_f = \frac{V}{hA_s} \left( \frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right) \left( 1 + \frac{Bi_s}{4} \right)$ $\Delta H_1 = Cp_u(T_i - T_{fm}) \text{ y } \Delta H_2 = L_f + Cp_l(T_{fm} - T_a)$ $\Delta T_1 = \frac{(T_i + T_{fm})}{2} - T_a \text{ y } \Delta T_2 = T_{fm} - T_a$	<p>La ecuación de Pham toma en cuenta el tiempo de enfriamiento, cambio de fase y subenfriamiento, para el calculo del tiempo total de congelación .</p>

En el modelo desarrollado por Nagaoka *et al.* 1955, la principal modificación que realiza respecto al modelo de Plank es la incorporación del término  $\Delta H$ , el cual se refiere al cambio de la entalpía del alimento al inicio y final del proceso de congelación. Nagaoka *et al.* 1955 evaluaron el cambio de entalpía ( $\Delta H$ ) que experimentan los alimentos durante el proceso de congelación, consideraron el calor que se elimina desde la temperatura inicial ( $T_i$ ) del alimento hasta su temperatura de congelación ( $T_f$ ), así como la liberación de calor durante el cambio de fase ( $\lambda_v$ ) y por último el calor eliminado del alimento para que pueda pasar de la temperatura de congelación a la temperatura final (esta temperatura no debe coincidir necesariamente con la temperatura del medio de congelación, pero puede ser ligeramente superior).

En cuanto al modelo desarrollado por Cleland & Earle (1984), las modificaciones principales respecto a la ecuación de Plank son los factores de forma **P** y **R**, los cuales fueron modificados empíricamente por medio de una regresión lineal múltiple dejando expresados **P** y **R** en función de los números adimensionales de Planck ( $N_{PK}$ ) y Stefan ( $N_{ste}$ ). Este método abarca un tiempo de congelación desde la temperatura inicial hasta  $-10^\circ\text{C}$  en el centro térmico del alimento.

Por último el modelo desarrollado por Pham (1986), es un método que puede ser utilizado para la predicción del tiempo de congelación de alimentos de tamaño finito y formas irregulares, a diferencia de los anteriores métodos, los cuales son útiles para alimentos de forma regular. Otra ventaja de este método es que es fácil de usar, y proporciona valores del tiempo de congelación con una precisión razonable. La ecuación desarrollada por Pham (1986), es una versión simplificada del modelo desarrollado por Pham (1984) la cual toma en cuenta el tiempo de enfriamiento ( $t_1$ ), cambio de fase ( $t_2$ ) y de subenfriamiento o templado ( $t_3$ ), por lo que el tiempo de congelación total es la suma de todas las etapas mencionadas (Ecuación 1.2), en ésta la predicción del tiempo de congelación se realiza a través de una temperatura de congelación media. En el desarrollo de este método se planteó que las condiciones en el ambiente ( $T_a$ ) y la temperatura inicial ( $T_i$ ) son constantes, se estableció un valor fijo de la temperatura final del producto ( $T_c$ ) y el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) se describe mediante la Ley de enfriamiento de Newton.

$$t_f = t_1 + t_2 + t_3 \quad (1.2)$$

$$t_{fi} = \frac{Q_i}{hA_s\Delta T_{mi}} \left( 1 + \frac{Bi_i}{k_i} \right) \quad (1.3)$$

donde,  $i = 1, 2, 3$ ; las variables de la Ecuación 1.3 están definidas en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Definición de la variables para el calculo del tiempo de congelación

Etapa	Variables
Enfriamiento	$i = 1$
	$k = 6$
	$Q_1 = C_l (T_i - T_{fm}) V$
	$Bi_1 = (Bi_l - Bi_s) / 2$
	$\Delta T_{m1} = \frac{(T_i - T_1) - (T_{fm} - T_1)}{\ln\left(\frac{T_i - T_1}{T_{fm} - T_1}\right)}$
Cambio de fase	$i = 2$
	$k_2 = 4$
	$Q_2 = L_f V$
	$\Delta T_{m2} = T_{fm} - T_1$
Subenfriamiento	$i = 3$
	$k = 6$
	$Q_3 = C_s (T_{fm} - T_c) V$
	$Bi_3 = Bi_s$
	$\Delta T_{m3} = \frac{(T_{fm} - T_1) - (T_0 - T_1)}{\ln\left(\frac{T_{fm} - T_1}{T_b - T_1}\right)}$

donde  $A_s$  ( $m^2$ ) es el área a través de la cual se transfiere el calor;  $Bi_l$  y  $Bi_s$  es el número de Biot para la etapa de enfriamiento y cambio de fase, respectivamente;  $C_l$  y  $C_s$  es la capacidad calorífica volumétrica ( $J/m^3 \cdot ^\circ C$ ) antes del punto inicial de congelación y por debajo de éste, respectivamente;  $L_f$  es calor latente de fusión volumétrico ( $J/m^3$ );  $Q_1$ ,  $Q_2$  y  $Q_3$  (J) son los calores de enfriamiento, cambio de fase y subenfriamiento, respectivamente;  $\Delta T_{m1}$ ,  $\Delta T_{m2}$  y  $\Delta T_{m3}$  son las diferencias logarítmicas de temperatura media, durante las etapas de enfriamiento, cambio de fase y subenfriamiento;  $T_c$  es la temperatura final en el centro geométrico ( $^\circ C$ );  $T_i$  es la temperatura inicial ( $^\circ C$ );  $T_{fm}$  es el punto medio de congelación ( $^\circ C$ );  $T_1$  es la temperatura del medio de congelación ( $^\circ C$ );  $T_b$  es la temperatura media final ( $^\circ C$ );  $V$  es el volumen del alimento ( $m^3$ ).

Pham (1984) propuso la Ecuación 1.4 para determinar la temperatura de congelación media.

$$T_{fm} = 1.8 + 0.263T_c + 0.105T_a \quad (1.4)$$

### 1.1.5. Aplicación de otras tecnologías en el proceso de congelación

De forma general, durante el proceso de congelación, especialmente para alimentos de gran tamaño, conducen al desarrollo de grandes gradientes de temperatura, siendo en la superficie del alimento donde se experimenta una congelación rápida, produciendo una gran cantidad de peque-

ños cristales de hielo, mientras que el interior del alimento se experimenta una congelación lenta la cual produce la formación de grandes cristales de hielo, lo que conduce a una inadecuada calidad del producto. En este sentido, la tecnología de congelación ha avanzado, por lo que actualmente se están desarrollando nuevas técnicas de congelación los cuales tienen como objetivo aumentar la eficiencia de la transferencia de calor para lograr una rápida congelación y controlar el proceso de formación de cristales de hielo y de esta forma minimizar el daño mecánico que sufre el alimento durante el proceso de congelación. Entre estos nuevos métodos se encuentra la congelación asistida por alta presión, con microondas y con ultrasonido.

### ■ Congelación a alta presión

La congelación por alta presión es una técnica que permite conservar al máximo el color, el sabor y el valor nutritivo de los alimentos, cuando la congelación se realiza en condiciones de alta presión, la formación de los cristales de hielo será homogénea tanto en la superficie como en el interior del producto, minimizando así el daño en los tejidos. Durante el proceso de congelación convencional se provoca un aumento del volumen del producto, lo que da lugar a un daño en los tejidos del alimento. El concepto de volumen libre puede ayudar a comprender la relación entre presión y los cambios en las propiedades mecánicas durante el cambio de fase. A diferencia del efecto de la temperatura, el volumen libre disminuye con el aumento de la presión. El punto de congelación del agua disminuye desde 0°C a 0.1 MPa hasta -21°C a 210 MPa (Figura 1.3). Cuando la presión es superior a 210 MPa, se observa un efecto contrario y es posible congelar una muestra por encima de los 0°C a presiones superiores a los 600 MPa. Como se muestra en la Figura 1.3, el agua pasa por diferentes etapas para formar distintos tipos de hielo (I-VI) a diferentes presiones y temperaturas.

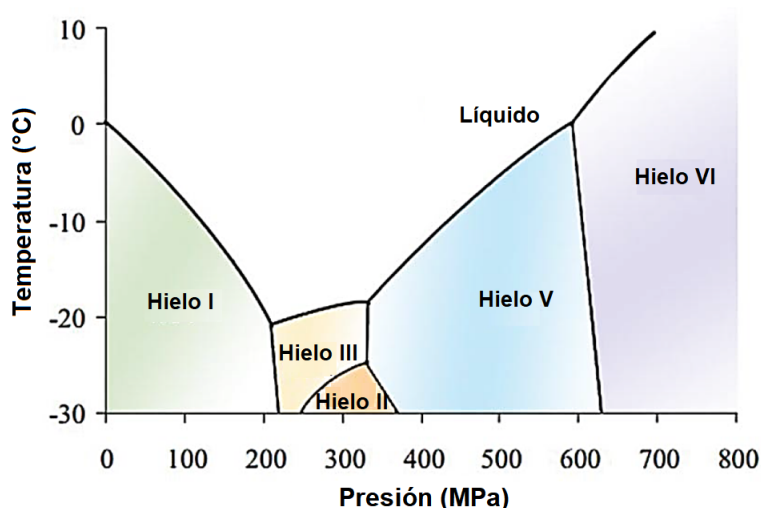


Figura 1.3. Diagrama de fases del agua. Fuente: Wu *et al.* 2017

La densidad del hielo varía según el tipo de hielo. El volumen del agua aumenta durante la

congelación a presión atmosférica debido a la formación de hielo tipo I, este tipo de hielo tiene una densidad menor que la del agua ( $920 \text{ Kg/m}^3$ ). Durante la congelación a presiones que oscilan entre 0 y 210 MPa, el agua generalmente cambia a hielo tipo I. El hielo tipo II se puede convertir a hielo tipo VI si la presión se aumenta continuamente, como resultado el volumen del agua no se expande durante la congelación y se puede reducir el daño mecánico en el tejido del alimento. El hielo tipo IV no existe, ya que este se convierte en hielo tipo II y III inmediatamente. Por otro lado, se puede formar hielo VI a una temperatura ambiente si la presión es mayor a los 800 MPa, este tipo de hielo tiene una densidad de  $1310 \text{ Kg/m}^3$ ; por lo que los materiales alimenticios se pueden congelar sin ningún tipo de enfriamiento (Cheng *et al.*, 2015; Wu *et al.*, 2017; Zhan *et al.*, 2018). La congelación a alta presión es particularmente beneficiosa para congelar grandes trozos de comida cuando se requieren cristales de hielo pequeños y uniformes. No obstante, aunque la congelación asistida por alta presión es más cara que la congelación convencional, puede volverse económicamente más viable en el futuro.

#### ■ Congelación asistida por campo eléctrico

Una de las tecnologías existentes para controlar el inicio de la nucleación dentro de un proceso de congelación es la congelación asistida por un campo eléctrico, el interés por esta técnica es debido a su considerable efecto sobre el proceso de nucleación, su fácil operación, bajo consumo energético y su fácil integración en equipos de congelación disponibles comercialmente (Dalvi-Isfahan *et al.*, 2016). La congelación asistida por campo eléctrico promueve una nucleación más rápida del hielo, así como también induce la nucleación a un menor grado de subenfriamiento. Cuando el campo eléctrico es aplicado en sustancias polares como el agua, la molécula de agua sufre una polarización mediante la reorientación de las moléculas de agua en la dirección del campo eléctrico, reduciendo de esta manera la energía libre del sistema. La magnitud de este comportamiento depende del campo eléctrico aplicado y la constante dieléctrica de los materiales (Fallah-Joshaqani *et al.*, 2019). De acuerdo a la literatura, la aplicación de un campo eléctrico tiene un efecto positivo sobre los parámetros de calidad de los alimentos, como la textura, microestructura, color y pérdida por goteo, la aplicación de un campo eléctrico durante la congelación ayuda a producir numerosos cristales de hielo de tamaño pequeño, y por lo tanto, minimiza el daño celular, reduciendo la pérdida por goteo, disminuye la desnaturalización de proteínas y preserva la textura de los alimentos frescos después de descongelados (Orlowska *et al.*, 2009; Sutariya & Sunkesula, 2021).

#### ■ Congelación asistida con microondas

Las microondas son ondas electromagnéticas con una longitud de onda de entre 10 mm a 1 m, con una frecuencia de entre 300 MHz y 30 GHz (Guo *et al.*, 2017). Se ha reportado que la aplicación de perturbaciones eléctricas y/o magnéticas sirve como un posible medio para reducir el tamaño

de los cristales de hielo durante la congelación de matrices alimenticias. Xanthakis *et al.* 2014 encontraron que el tamaño de los cristales de hielo formado se redujo significativamente durante la congelación asistida por microondas, lo que provocó un daño menor en la microestructura de la carne. La congelación asistida con microondas es una tecnología que crea perturbaciones electromagnéticas durante el proceso de cristalización de un producto. La aplicación de las ondas de microondas provoca una rotación de las moléculas de agua y de las moléculas con carga eléctrica en el interior del alimento. Las moléculas son dipolos eléctricos y giran en su intento de alinearse con el campo eléctrico inducido por las ondas de microondas. Este movimiento molecular genera calor debido a la fricción generada por las moléculas en rotación (Xanthakis *et al.*, 2014). Algunos autores tienen la hipótesis que la reducción del tamaño de los cristales de hielo durante el proceso de congelación asistido con microondas es debido a que la rotación de las moléculas de agua provocada por el campo eléctrico generado por las ondas de microondas interfiere en la red de enlaces de hidrógeno, lo cual podría ser el precursor de la estructura cristalina. Por otro lado, se cree que el calentamiento generado por las microondas induce la fusión parcial de los cristales de hielo (nucleación secundaria), dando lugar a más cristales de hielo de dimensiones más pequeñas (Sadot *et al.*, 2020). Actualmente, la congelación asistida por microondas se encuentra en una etapa temprana de desarrollo y solo pocos estudios de matrices alimenticias se han reportado (Jha *et al.*, 2020).

#### ■ Congelación asistida con ultrasonido

Durante los últimos años se ha estudiado que la aplicación del ultrasonido en un rango de frecuencias de 20 a 100 kHz y una intensidad superior a los  $1 \text{ W/cm}^2$ , puede causar cambios en el material o en el proceso en donde es aplicado (Qiu *et al.*, 2020). Por lo tanto, ya han sido reportados trabajos en donde la aplicación del ultrasonido ha sido utilizado con el fin de causar cambios positivos en procesos de congelación de alimentos (Tabla 1.4). Sin embargo, para poder entender la influencia del ultrasonido en la congelación de los alimentos, se debe tener en cuenta que, durante el proceso de congelación ocurren dos procesos importantes, siendo el primero el inicio de la nucleación del hielo y el segundo, el crecimiento de cristales, el cual repercute sobre la calidad final de los alimentos congelados ya que ésta depende en gran medida de la distribución y tamaño de los cristales de hielo.

Generalmente, la velocidad de nucleación del hielo es más lenta que el crecimiento de los cristales de hielo en condiciones de congelación más lentas; los cristales de hielo crecerán hasta un tamaño comparativamente grande que destruirá los tejidos celulares de los alimentos, en lugar de formar muchos cristales de hielo pequeños y uniformes dentro de la célula, que pueden proteger la micro-estructura de los alimentos (Fu *et al.*, 2020). Por lo tanto, acelerar el proceso de congelación podría disminuir el tamaño de los cristales de hielo y preservar de una mejor forma las propieda-

des originales de los alimentos, las cuales están generalmente relacionadas con la producción de alimentos de alta calidad (Figura 1.4).

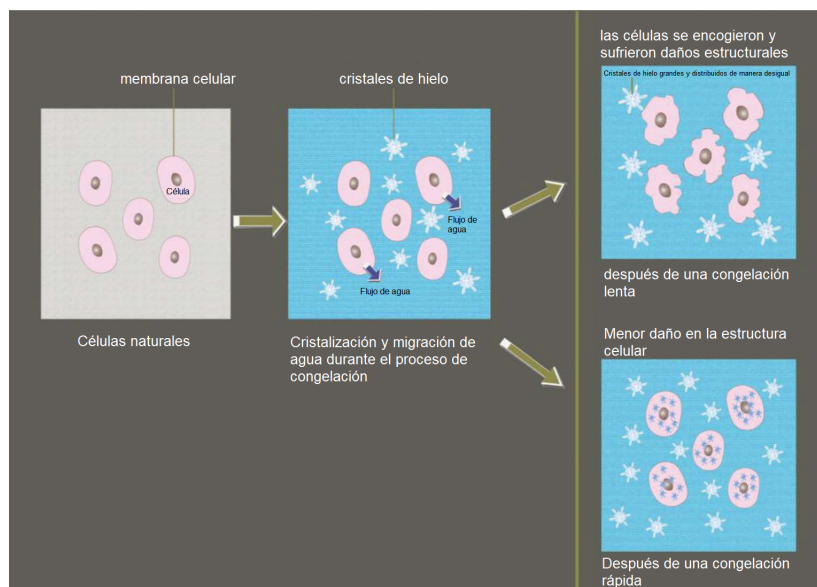


Figura 1.4. Impacto de la velocidad de congelación sobre la calidad final de una matriz alimenticia  
Fuente: Wu *et al.* 2017

El inicio de la nucleación es un factor importante para la optimización del proceso de congelación, sin embargo, la nucleación es espontánea y la temperatura a la que tiene lugar no puede predecirse con certeza. Por lo tanto, se ha encontrado que el UAI es capaz de inducir la nucleación en soluciones acuosas, así como también en alimentos sólidos. Cheng *et al.* (2014), reportaron que la aplicación del UAI en muestras de fresa (*Fragaria x ananassa Duch*) es capaz de iniciar la nucleación a un grado inferior de superenfriamiento ( $-1.6^{\circ}\text{C}$ ) en comparación con las muestras control, no obstante, no encontraron una correlación lineal entre el grado de superenfriamiento y la intensidad del ultrasonido. Resultados similares fueron reportados por Xu *et al.* (2014) y Comandini *et al.* (2013), quienes estudiaron el efecto de la aplicación del UAI durante la congelación por inmersión de cilindros de rábano y cubos de papa, respectivamente; ambos encontraron que el UAI es capaz de inducir una nucleación anticipada cuando la temperatura del centro geométrico de sus muestras fue de  $-0.5^{\circ}\text{C}$  y  $-0.1^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, también observaron una correlación lineal entre la temperatura de nucleación y la temperatura a la cual fue aplicado el UAI.

Tabla 1.4. Estudios reportados de la congelación por inmersión asistida con ultrasonido de alta intensidad en matrices alimenticias.

Matriz (forma y tamaño)	Condiciones	Variables (Ultrasonido)	Referencia
Fresa Tamaño y forma uniforme	T <sub>0</sub> : 5°C T <sub>f</sub> : -18°C T <sub>∞</sub> : -25°C (CaCl <sub>2</sub> al 30%) t <sub>c</sub> : 1380 s a 780 s Punto de congelación: -0.8°C	Frecuencia: 30 kHz IU: 0.09, 0.17, 0.26 y 0.37 W/cm <sup>2</sup> T: -0.1, -0.6, -1.1, -1.6 y -2.1°C t: 30 s Ciclo de trabajo: 5 s on/5 s off	Cheng <i>et al.</i> (2014)
Rábano Cilindro (2.5 cm de diámetro y 3 cm de longitud)	T <sub>0</sub> : 4°C T <sub>f</sub> : -18°C T <sub>∞</sub> : -20°C (CaCl <sub>2</sub> al 30%) t <sub>c</sub> : 950 s Punto de congelación: -0.7°C	Frecuencia: 20 kHz IU: 0.09, 0.17, 0.26 y 0.37 W/cm <sup>2</sup> T: -0.5, -1, -1.5 y -2°C t: 0, 3, 7, y 15 s	Xu <i>et al.</i> (2014)
Papa Cubo (1.5 cm <sup>3</sup> )	T <sub>0</sub> : 9°C T <sub>f</sub> : -45°C T <sub>∞</sub> : -6°C (glicerol-agua 1:1) t <sub>c</sub> : 3,180 s a 3,990 s Punto de congelación: -1°C	Frecuencia: 35 kHz P: 0-100% T: -0.1, -1.1, -1.6, -2.1, -2.6 y -3°C t: 8 s	Comandini <i>et al.</i> (2013)
Brócoli (5 cm de diámetro)	T <sub>0</sub> : 8.5°C T <sub>f</sub> : -18°C T <sub>∞</sub> : -25°C (CaCl <sub>2</sub> al 40%) t <sub>c</sub> : 650 s a 875 s Punto de congelación: -0.6°C	Frecuencia: 20 y 30 kHz P: 0, 125, 150, 175 y 190 W T: 0, -0.5 y -5°C t: 120 y 180 s Ciclo de trabajo: 60 s on/60 s off	Xin <i>et al.</i> (2014a)
Setas Cubo (17x17x17mm)	T <sub>0</sub> : 10°C T <sub>f</sub> : -20°C T <sub>∞</sub> : -25°C (etilenglicol-agua 1:1) t <sub>c</sub> : 400 s Punto de congelación: -0.9 °C	Frecuencia: 20 kHz IU: 0.13, 0.27 y 0.39 W/cm <sup>2</sup> Ciclos de trabajo: 10 s on/10 s off	Islam <i>et al.</i> (2014)
Brócoli (5 cm de diámetro)	T <sub>0</sub> : 8.5°C T <sub>f</sub> : -18°C T <sub>∞</sub> : -25°C (CaCl <sub>2</sub> al 30%) t <sub>c</sub> : 650 s a 850 s Punto de congelación: -0.6°C	Frecuencia: 20 y 30 kHz P: 0, 125, 150, 175 y 190 W Ciclo de trabajo: 60 s on/60 s off	Xin <i>et al.</i> (2014b)
Rábano Cilindro (2.5 cm de diámetro y 3 cm de longitud)	T <sub>0</sub> : 4°C T <sub>f</sub> : -18°C T <sub>∞</sub> : -20°C (CaCl <sub>2</sub> al 30%) t <sub>c</sub> : 744 s a 806 s Punto de congelación: -0.7 °C	Frecuencia: 20 kHz IU: 0.09, 0.17, 0.26 y 0.37 W/cm <sup>2</sup> Ciclo de trabajo: 30 s on/30 s off	Xu <i>et al.</i> (2015)

Mazana, rábano y papa	$T_0$ : 4°C	Frecuencia: 28 kHz	
Cilindro (1.7 cm de diámetro y 2 cm de longitud)	$T_f$ : -18°C $T_\infty$ : -18°C (etilenglicol al 30% V/V) $t_c$ : 750 s a 620 s	IU: 0.062 W/cm <sup>2</sup> T: -0.5 °C t: 2 min Ciclo de trabajo: 30 s on/30 s off	(Zhu <i>et al.</i> , 2018)
Carpa ( <i>Cyprinus carpio</i> )	$T_0$ : 4°C $T_f$ : -18°C	Frecuencia: 30 kHz IU: 0.27 W/cm <sup>2</sup>	
Rebanadas 5 cm de longitud	$T_\infty$ : -25°C (etanol al 95% mas 5% de fluor) $t_c$ : 47 min a 50 min	T: 0 °C t: 9 min	(Sun <i>et al.</i> , 2019)

$T_0$ : Temperatura inicial de la muestra;  $T_f$ : Temperatura final de la muestra;  $T_\infty$ : Temperatura del medio de inmersión;  $t_c$ : Tiempo de congelación; IU: Intensidad ultrasónica; T: Temperatura de aplicación del ultrasonido; t: Tiempo de aplicación del ultrasonido; P: Potencia eléctrica suministrada

Aunque varios aspectos del fenómeno de nucleación inducidos por la aplicación de UAI han sido ampliamente reportados, el mecanismo de la nucleación inducida por ultrasonido aún no se entiende adecuadamente. Se han propuesto una serie de teorías para explicar el mecanismo de nucleación inducido por aplicación del UAI, en donde la teoría desarrollada por Hickling, es la más citada. De acuerdo a esta teoría, el colapso violento de las burbujas de cavitación producidas por el ultrasonido genera una presión local muy alta (5 GPa o más) en un tiempo muy corto, lo cual aumenta la temperatura de congelación de equilibrio del agua, resultando en altos grados de superenfriamiento, lo cual sirve como una fuerza motriz para la nucleación instantánea (Hickling, 1965). Además, estas burbujas de cavitación pueden actuar como núcleos para la nucleación del hielo, mientras alcanzan el tamaño crítico del núcleo (Inada *et al.*, 2001). Por lo que, el UAI puede promover el proceso de cristalización en una solución que comienza sin cristales preexistentes (Chow *et al.*, 2005; Saclier *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2014).

Por otro lado, no solo el efecto del UAI sobre la iniciación de la nucleación ha sido estudiado, sino que también la velocidad de congelación ha sido de interés en varios estudios. La velocidad de congelación es un parámetro importante que influye sobre la calidad de los alimentos congelados, debido a que ésta determina el tamaño de los cristales de hielo, el grado de deshidratación celular y el daño a la estructura del tejido. Xu *et al.* (2015), estudiaron el efecto de la aplicación del UAI, sobre la velocidad de congelación durante el proceso de congelación por inmersión de cilindros de rábano. Los resultados mostraron que el UAI mejoró significativamente la velocidad de congelación, a una intensidad ultrasónica de 0.26 W/cm<sup>2</sup>, acortando el tiempo de congelación en un 90% en comparación con la congelación por inmersión sin aplicación del UAI. En tanto que Xin *et al.* (2014a) evaluaron el efecto del UAI sobre la velocidad de congelación en muestras de

brócoli (*brassica oleracea L. var. botrytis L.*). Los resultados mostraron que el tiempo total de congelación y los tiempos requeridos para las fases de enfriamiento, cambio de fase y subenfriamiento del brócoli se redujeron significativamente mediante la congelación asistida con UAI a un nivel de potencia de 150W (30kHz) o 175W (20 kHz). Zhu *et al.* 2018, encontraron que la aplicación del ultrasonido redujo el tiempo total de congelación de manzanas, rábanos y papas en un 5.4, 17.75 y 26.32%, respectivamente, en comparación con la congelación por inmersión convencional. La aplicación del ultrasonido indujo principalmente la generación de núcleos de hielo, lo que provocó el acortamiento del tiempo de cambio de fase y con ello la mejora en la velocidad de congelación. En general, una congelación rápida puede mantener una adecuada calidad de los alimentos en comparación de una congelación lenta por lo que se ha demostrado que el UAI es capaz de acelerar el proceso de congelación de diferentes matrices alimenticias.

Finalmente, la mejora en la calidad de los alimentos congelados con UAI ha sido evaluada, por lo que investigaciones recientes mostraron que se puede mejorar la microestructura de los alimentos congelados. En este sentido, Xin *et al.* (2014b) estudiaron el efecto de la congelación por inmersión asistida con UAI, sobre los parámetros de calidad del brócoli (*Brassica oleracea L. var. botrytis L.*), mostrando que a una intensidad ultrasónica en un rango de 0.250-0.412 W/cm<sup>2</sup>, el tiempo de congelación disminuyó y también la pérdida del contenido de calcio unido a la pared celular. En cuanto a los parámetros texturales, color, contenido de ácido L-ascórbico y la microestructura del brócoli fueron mejor conservados y la pérdida por goteo fue minimizada por la aplicación del UAI. Resultados similares fueron reportados por Islam *et al.* (2014), quienes encontraron que la aplicación del UAI en la congelación por inmersión de tres variedades de setas (*Lentinula edodes*, *Pleurotus eryngii* y *Agaricus bisporus*), mejoró la microestructura de las muestras y redujo significativamente la pérdida por goteo. Sun *et al.* 2019, encontraron que el ultrasonido promovió la formación de cristales de hielo más pequeños y uniformes, lo que ayudó a mantener la integridad del tejido muscular del pescado carpa común (*Cyprinus carpio*), reduciendo las pérdidas por descongelación, así como también mejoró el valor de  $L^*$  (luminosidad) con respecto a la congelación sin ultrasonido. Esta mejor preservación de la estructura celular provocada por la aplicación del UAI puede atribuirse a factores, tales como una mayor velocidad de congelación, debido a que una rápida congelación provocada por la acción del UAI conduce a la formación de pequeños cristales de hielo, lo cual minimiza el daño a la estructura celular. Otro factor, es la fragmentación de los cristales, debido a que los cristales de hielo con gran tamaño que crecen aleatoriamente, pueden fracturarse debido a la variación de la presión acústica, lo que asegura aún más la formación de diminutos y uniformes cristales de hielo (Cheng *et al.*, 2017).

## 1.2. Ultrasonido

### 1.2.1. Generalidades

El ultrasonido se puede definir como las ondas acústicas inaudibles al ser humano, de una frecuencia generalmente superior a los 20 kHz (Bhargava *et al.*, 2020; Fu *et al.*, 2020). De la misma manera que cualquier sonido, el ultrasonido se transmite a través de toda sustancia, sólida, líquida o gaseosa, que posea propiedades elásticas (Picó, 2013). La fuente de producción de ultrasonidos suele ser un cuerpo vibrante, el movimiento de vibración de dicho cuerpo se comunica a las moléculas del medio, cada una de las cuales transmiten, a su vez, el movimiento a las moléculas adjuntas y retorna aproximadamente a su posición original (Ozuna López, 2014). El ultrasonido se ha considerado como un tipo de energía vibratoria la cual es producida por transductores pizeoeléctricos, los cuales tienen la capacidad de convertir energía eléctrica en energía ultrasónica (energía mecánica) (Bhargava *et al.*, 2020). De acuerdo a la física, la clasificación de una onda de sonido se realiza en base a su frecuencia de oscilación; las ondas que tienen frecuencias oscilantes de 0.0001 a 20 Hz se denominan infrasonido y las ondas con frecuencias oscilantes de 18 kHz y superiores se denominan ultrasonido (Figura 1.5). A su vez el ultrasonido puede clasificarse en dos categorías de acuerdo a la intensidad y frecuencia utilizada (Legay *et al.*, 2011):

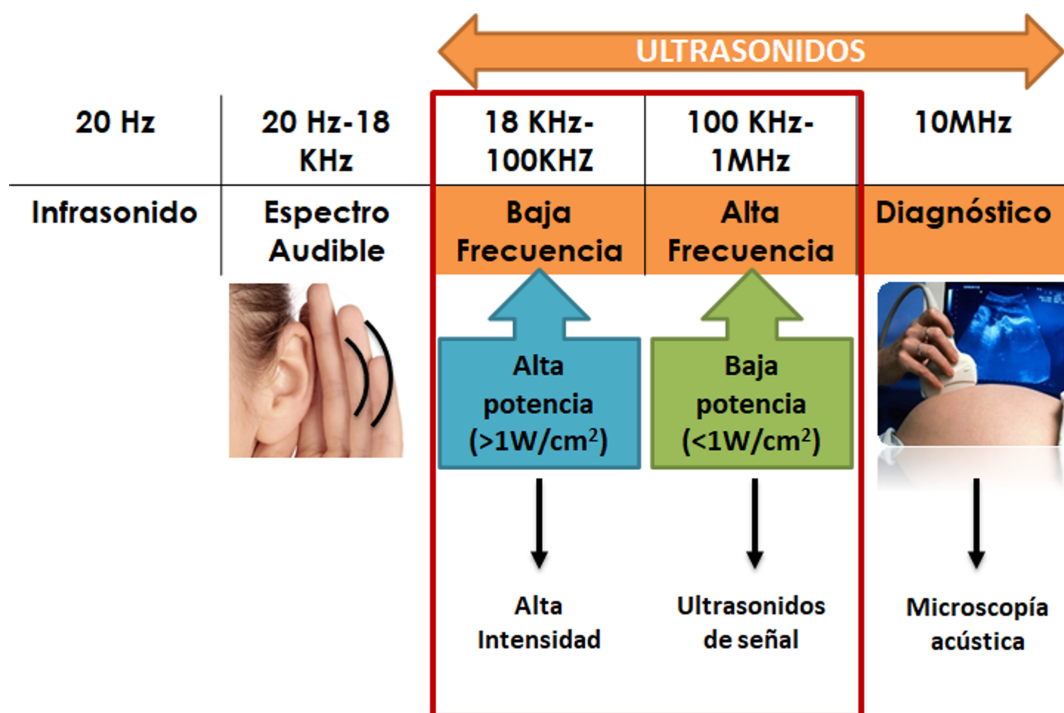


Figura 1.5. Escala del ultrasonido. Fuente: Corona-Jiménez, 2013

- **Ultrasonido de diagnóstico.** Dentro del ultrasonido de baja intensidad a una frecuencia en un rango 1 MHz a 10 MHz se encuentra el ultrasonido de diagnóstico también conocido como **microscopia acústica**, debido a las frecuencias tan altas que se emplean (en el rango de mega hertz, MHz) esta no afecta el medio de propagación y por lo tanto, se utilizan para el diagnóstico médico (ecografías) y para la supervisión de soldaduras y detección de grietas (Watson *et al.*, 2012).
- **Ultrasonido de señal o baja intensidad**, utiliza altas frecuencias que van de los 100 kHz a 1 MHz y bajas intensidades ( $<1 \text{ W/cm}^2$ ) (Figura 1.5), estas ondas se pueden utilizar para evaluar las propiedades físico-químicas y estructurales (forma, tamaño y dimensiones) de los alimentos; estas ondas pueden determinar la composición de productos alimenticios como lo son los productos cárnicos y fermentados, así como también en pescado y aves de corral. Se emplean como una herramienta para el análisis no invasivo y no destructivo de productos alimenticios durante el procesamiento y almacenamiento (Awad *et al.*, 2012; Corona *et al.*, 2014). El ultrasonido de señal también es adecuado para el control de calidad de frutas y verduras frescas, tanto para las operaciones previas como posteriores a la cosecha (Arvanitoyannis *et al.*, 2017). Las aplicaciones del ultrasonido de señal se basa en la información que se puede extraer de los cambios que sufre la onda acústica cuando se propaga por el material, lo cual es debido a que la velocidad y atenuación de la onda varía en función de las propiedades físicas del medio (Corona *et al.*, 2013). En el caso de la información obtenida de la estructura, dimensiones y composición del producto, debido a la interacción entre el material y las ondas ultrasónicas de alta frecuencia, también es debido a la baja intensidad ultrasónica la cual crea sinergismo en esta interacción. En cuanto a la información sobre las propiedades físico-químicas del material, son proporcionadas por el mecanismo de absorción de la onda el cual se asocia con materiales homogéneos y de dispersión con materiales heterogéneos (Arvanitoyannis *et al.*, 2017; Dukhin *et al.*, 2005).
- **Ultrasonido de potencia o alta intensidad**, utiliza altos niveles de intensidad ( $> 1 \text{ W/cm}^2$ ) y bajas frecuencias que van desde los 18 kHz a los 100 kHz (Figura 1.5). Las ondas de ultrasonido de alta intensidad y baja frecuencia se caracterizan por ser ondas disruptivas y, por lo tanto, inducen efectos considerables sobre las propiedades físicas, bioquímicas y mecánicas de los productos alimenticios en donde son aplicados, en contraste con el ultrasonido de baja intensidad (Mason *et al.*, 2011). Este rango de frecuencias del ultrasonido de alta intensidad ( $10 \text{ a } 1000 \text{ W/cm}^2$ ) y efectos del ultrasonido, tiene una amplia aplicación en diferentes operaciones unitarias como lo son la congelación, secado, ablandamiento, extracción y descongelación (Bhargava *et al.*, 2020; Fan *et al.*, 2017; Fu *et al.*, 2020), en este caso el

ultrasonido se utiliza para intensificar los procesos de transferencia de calor y masa en cada una de las operaciones unitarias mencionadas. Por otro lado, el ultrasonido ha sido aplicado en lugar de las operaciones convencionales de procesamiento de alimentos con el fin de controlar la microestructura y modificar las propiedades texturales de los productos grasos (sonocristalización), así como también en los procesos de emulsificación, antiespumante y en la modificación de las propiedades funcionales de proteínas alimentarias (Arvanitoyannis *et al.*, 2017; Bhargava *et al.*, 2020; Povey, 2017).

Por otra parte, como se había mencionado anteriormente el ultrasonido es un tipo de onda acústica, y por lo tanto, parámetros ultrasónicos como la frecuencia, amplitud, longitud de onda, entre otros, pueden afectar el medio en donde es aplicado, según el valor de éstos. A continuación se describen cada uno de ellos:

- La **velocidad acústica**, es la velocidad de propagación de la onda, 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 como se observa en la Ecuación 1.5.

$$v_a = \lambda f_r \quad (1.5)$$

- La **frecuencia** ( $f_r$ ) se define como el número de vibraciones o de ciclos completados por la onda en una unidad de tiempo. La unidad en el sistema internacional es el Hertz (Hz) definiéndose como el número de ciclos completados por segundo. El inverso de la frecuencia es el periodo, que se define como el tiempo necesario para completar un ciclo vibracional. El rango de frecuencias más utilizado durante la aplicación del ultrasonido de alta intensidad es de 20 a 100 kHz. A medida que aumenta la frecuencia, la intensidad de la cavitación disminuye en el medio líquido. A una alta frecuencia, los ciclos de compresión descompresión pueden ser demasiado cortos para permitir el crecimiento de las burbujas de cavitación. La duración de la fase de descompresión (para el crecimiento de la burbuja de cavitación) es inversamente proporcional a la frecuencia ultrasónica. Por lo tanto, se requieren mayores amplitudes e intensidades para generar el fenómeno de cavitación a una alta frecuencia.
- La **longitud de onda** ( $\lambda$ ) es la distancia entre dos planos en los que las partículas se encuentran en el mismo estado de vibración, o lo que es igual, la distancia entre dos puntos consecutivos que vibran en fase (Figura 1.6). Se determina a partir de la velocidad de la onda y la frecuencia.

- La **amplitud de onda** es el máximo desplazamiento de la partícula desde la posición de equilibrio (Figura 1.6).
- **Intensidad** se define como 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 (Ecuación 1.6).

$$IU = \frac{P_A^2}{2\rho c} \quad (1.6)$$

Donde  $IU$  es la intensidad acústica ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  $P_A$  es la presión máxima (atm);  $\rho$  es la densidad del medio ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) y  $c$  es la velocidad de la onda (m/s) en el medio. Este parámetro está directamente relacionado con la amplitud del transductor y, en consecuencia, con la amplitud de presión de la onda sonora. A medida que aumenta la presión, el colapso de las burbujas será más violento.

- La **densidad de energía**, representa el trabajo realizado al desplazar las partículas en un medio, que por otra parte, esta sujeto a fuerzas contrarias al desplazamiento del propio medio elástico. Para una onda plana, la densidad de energía se puede expresar como (Ecuación 1.7):

$$E = \frac{IU}{c} \quad (1.7)$$

Donde  $E$  es la densidad de energía ( $\text{J}/\text{m}^3$ ). Puesto que la energía (J) se puede expresar en Newton por metro (Nm), las unidades de la densidad de energía se transforman en  $\text{N}/\text{m}^2$ , que son unidades de presión. Por lo tanto, la densidad de energía de una onda se corresponde con el nivel de presión acústica.

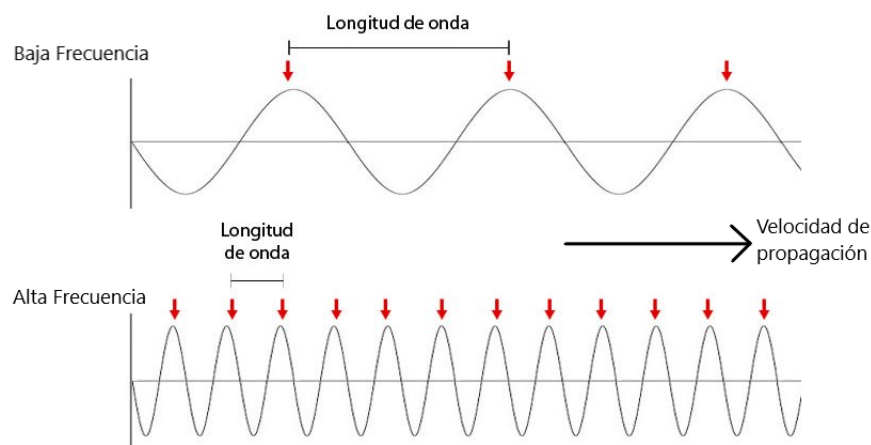


Figura 1.6. Longitud de onda y frecuencia.

- La **potencia acústica** es la energía total irradiada por una fuente por unidad de tiempo. Se puede calcular a partir de la Ecuación 1.8 :

$$P = IU * S \quad (1.8)$$

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

- **Atenuación**, es la reducción del nivel de una 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 la atenuación de la onda es la absorción, que retiene y convierte en calor a la energía.

En el presente trabajo se utilizaron ultrasonidos de alta intensidad, por lo que en las siguientes secciones se profundizará en aspectos como su generación y los efectos que producen sobre el producto o proceso en donde son aplicados.

### 1.2.2. Ultrasonido de alta intensidad

El ultrasonido es una tecnología de procesamiento de alimentos no térmica. Cuando una onda ultrasónica de alta intensidad se propaga a través de un medio (sólido, líquido y gas) provoca una serie de cambios en el material o en el proceso donde es aplicado. Estos efectos pueden explicarse mediante varios mecanismos asociados, que varían en función del medio donde se propaga la onda acústica. La mayoría de los efectos atribuidos al UAI en un medio líquido están producidos por el fenómeno de cavitación, el cual puede definirse como la formación, crecimiento y posterior colapso de burbujas de vapor y/o gas, en la cual se liberan grandes cantidades de energía (alta temperatura y presión local, 5000 K y 100 MPa, respectivamente) (Kiani *et al.*, 2012; Yao *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2015; Zheng & Sun, 2005). En ese sentido, cuando una onda ultrasónica se propaga en el medio líquido se producen una serie de compresiones y descompresiones, las cuales producen desplazamientos moleculares en dicho medio (Figura 1.7). Durante el ciclo de compresión, la distancia intermolecular se acorta, lo contrario ocurre durante el ciclo de descompresión, debido a que se genera una presión negativa que tiende a separar las moléculas (Figura 1.7).

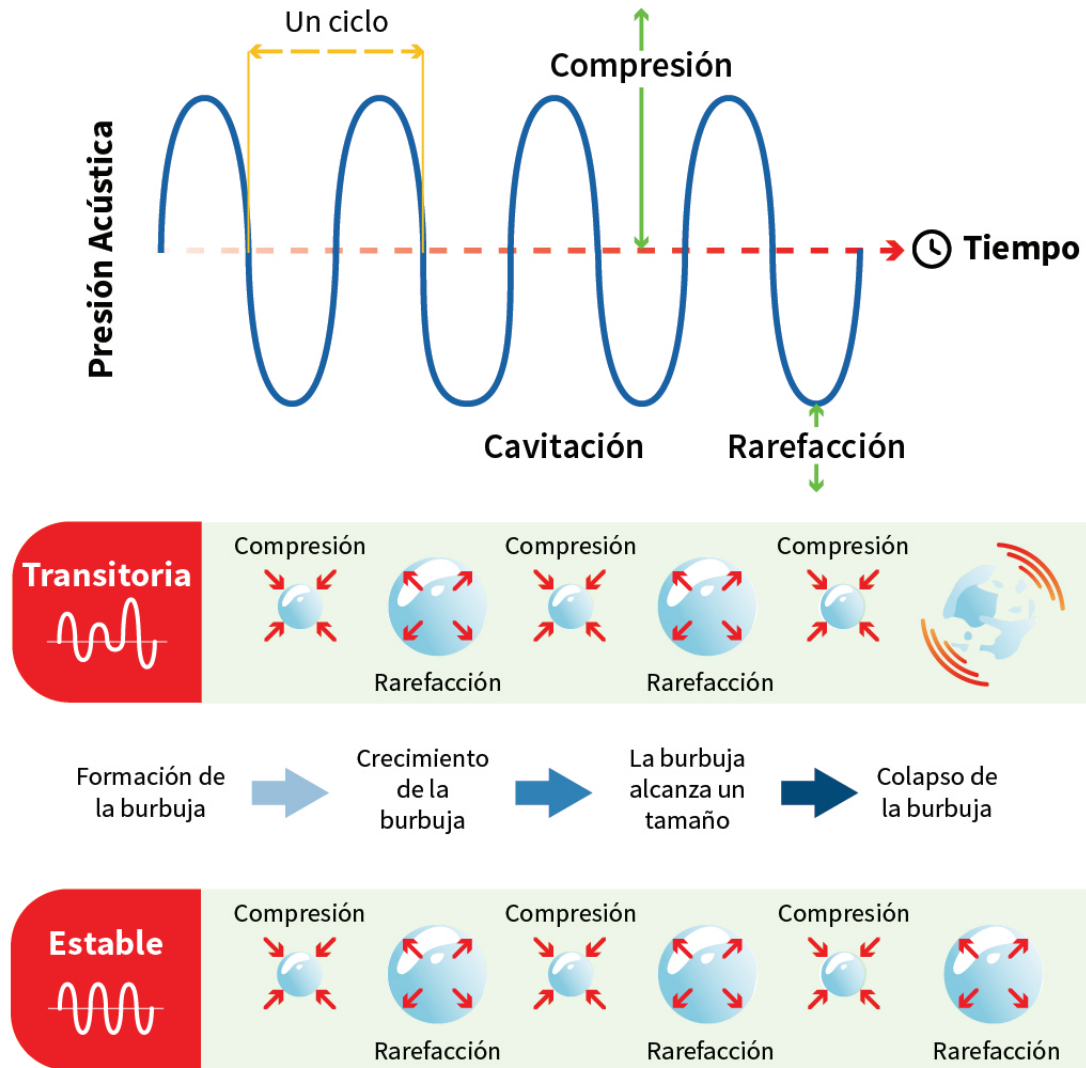


Figura 1.7. Cavitación estable y transitoria. Adaptada en el presente trabajo.

Cuando la intensidad ultrasónica es lo suficientemente elevada, las presiones negativas que se producen durante el ciclo de descompresión pueden vencer las fuerzas de atracción (como la tensión superficial) entre las moléculas del líquido, formándose así una burbuja de gas en el líquido (Feng *et al.*, 2011; Povey & Mason, 1998). El intercambio de gas entre el líquido y las burbujas de cavitación es proporcional a el área de transferencia (área de la burbuja). Por un lado durante el ciclo de descompresión, el flujo de gas se produce desde el líquido hacia la burbuja, provocando que esta se expanda. Por otro lado, 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 de la burbuja crece cada ciclo

(Capote & de Castro, 2007).

### 1.2.2.1. Tipos de cavitación

La cavitación acústica se clasifica en transitoria y estable, esta clasificación está en función del radio máximo alcanzado (tamaño resonante), tiempo de vida (que decide la extensión del colapso) y el patrón de colapso de las burbujas de gas o vapor. En el caso de la cavitación transitoria las burbujas se encuentran generalmente llenas de gas o vapor, la cuales se producen a una intensidad ultrasónica superior a  $10 \text{ W/cm}^2$  (Gogate, 2010; Yasui, 2018). Este tipo de cavitación implica una mayor variación del tamaño de las burbujas (el tamaño máximo alcanzado por la cavidad es unos cientos de veces el tamaño inicial) en una escala de tiempo de pocos ciclos acústicos. El tiempo de vida útil de la burbuja transitoria es demasiado pequeño ( $0.1 \mu\text{s}$ ) para que cualquier masa fluya por difusión del gas dentro o fuera de la burbuja; sin embargo, la evaporación y la condensación del líquido dentro de la cavidad pueden tener lugar libremente. Por lo tanto, como no hay gas que actúe como colchón, el colapso es violento; durante el colapso violento se producen emisiones de luz (sonoluminiscencia) y/o reacciones químicas (sonoquímicas) (Povey & Mason, 1998). El colapso de las burbujas de cavitación puede romper fácilmente las cadenas de polímeros o destruir las paredes celulares de los tejidos biológicos. Además, también puede provocar la ruptura de las moléculas de agua y con ello la formación de radicales libres altamente reactivos ( $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$ ), los cuales pueden reaccionar con otras moléculas (Riesz & Kondo, 1992; Zhu *et al.*, 2018). Los mecanismos mencionados anteriormente pueden inducir una serie de efectos físicos y químicos que pueden aprovecharse en el procesamiento de alimentos.

De modo contrario durante la cavitación estable la cual ocurre en un rango de intensidad ultrasónica de  $1$  a  $3 \text{ W/cm}^2$ , las burbujas que se forman alcanzan un tamaño estable y por lo tanto, tienen un vida útil muy larga, las burbujas pulsan suavemente sin ninguna emisión de luz ni reacciones químicas. La temperatura y presión generadas en este tipo de cavitación es menor en comparación con la cavitación transitoria y en este tipo de cavitación las burbujas que se forman están llenas en su mayoría de gas y solo contienen una cantidad pequeña de vapor (Gogate, 2010). El movimiento de las burbujas durante la cavitación estable provoca micro-corrientes (*microstreaming*), las cuales producen remolinos en el medio que las rodea. Cuando las burbujas de cavitación son estables (no se produce el colapso de éstas), el aire circundante se difunde dentro o fuera de ellas constantemente con la ayuda de las corrientes del flujo, produciendo un efecto de mezcla durante la oscilación de las burbujas de gas en un medio líquido, también la turbulencia generada por las micro-corrientes puede intensificar la transferencia de calor y masa (Zhang *et al.*, 2015; Zhu *et al.*, 2018).

### 1.2.2.2. Efectos físicos y químicos de la cavitación

Durante la oscilación y el colapso de las burbujas de cavitación se producen varios efectos físico-químicos secundarios, como lo son las ondas de choque (*shockwave*), microturbulencia (microturbulence), microcorrientes (microjet), formación de radicales libres y sonoluminiscencia, los cuales pueden tener un efecto significativo sobre la dinámica y el equilibrio del proceso en donde es aplicado el ultrasonido. Por ejemplo, los coeficientes de transferencia de calor y masa en un proceso asistido con ultrasonido de alta intensidad pueden incrementar su valor debido al efecto de mejora que proporciona la cavitación y sus efectos secundarios (Luo *et al.*, 2015).

Como ya se había mencionado anteriormente el colapso de las burbujas de cavitación produce altas presiones y temperaturas mucho más altas que las del líquido circundante. Esta enorme diferencia de temperatura y presión genera fuertes ondas de choque (*shockwave*) hacia el exterior de las burbujas de cavitación. La contracción y colapso de las burbujas de cavitación crean grandes vacíos en el líquido, mientras que el rápido flujo de líquido a los vacíos forma una violenta microturbulencia en el líquido local. El colapso asimétrico de las burbujas de cavitación en la interfaz sólido-líquido, puede generar una corriente de líquido que atraviesa la burbuja provocando que golpee la superficie del sólido (a una alta velocidad  $> 100$  m/s), este efecto es llamado microcorriente. Los anteriores efectos permiten intensificar la transferencia de materia y energía entre el sólido y el medio líquido, disminuyendo el espesor de la capa límite referencia (Cárcel *et al.*, 2012; Luo *et al.*, 2015).

Por otro lado, las cavidades o burbujas que se forman durante la cavitación transitoria, forman un vacío y dentro de este es casi seguro que contendrán vapor del medio líquido. Cuando las burbujas colapsan, los vapores que están en el interior de éstas son sometidos a condiciones extremas de alta temperatura y presión, lo cual origina que las moléculas se fragmenten y generen radicales libres. Si en el interior de la burbuja calentada, el vapor de agua está presente, éste se disocia y forma radicales libres altamente reactivos ( $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H} + \text{OH}$ ) como ya se mencionó anteriormente, estos se difunden desde la burbuja hacia el líquido circundante y reaccionan con otras moléculas si están presentes. La emisión de luz de las burbujas de cavitación (sonoluminiscencia) se debe básicamente a estados de especies excitadas las cuales vibran, es decir, radicales OH producidos como resultados de una alta temperatura y presión generada dentro de las burbujas de cavitación durante el colapso de éstas. Estas reacciones químicas se denominan reacciones sonoquímicas, las cuales pueden inducir efectos físicos y químicos con posibles aplicaciones en la industria alimenticia (Lévêque *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019; Merouani *et al.*, 2015; Yasui, 2018).

La mayor parte de la actividad cavitacional y sus efectos secundarios solo son efectivos a cierta distancia (aproximadamente una longitud de onda,  $\lambda$ ) del área de transducción, es decir, a varios centímetros de la superficie emisora. A una distancia  $X$  del área de transducción, la zona de acción del ultrasonido se puede dividir en zona cercana a la superficie ( $X < \lambda$ ), zona de flujo ( $X \sim \lambda$ ) y zona

lejana ( $X > \lambda$ ). En este sentido, la zona cercana a la superficie es la más adecuada para obtener una alta actividad cavitacional, mientras que en la zona de flujo y zona lejana, el rango de acción de la cavitación y sus efectos secundarios es más reducido; debido a que el líquido circundante absorbe gran parte de la energía acústica, mientras que los radicales reactivos producidos por la cavitación no pueden migrar lejos de la ubicación de la burbuja colapsada (Ensminger & Bond, 2011).

Por último la medición de la potencia ultrasónica real aplicada en un proceso sonoquímico puede ser estimada a través de diferentes métodos, los cuales evalúan los cambios físicos o químicos que ocurren en el medio líquido debido al ultrasonido. La medición directa de la presión acústica a través de un hidrófono (Moholkar *et al.*, 2000) y el método calorimétrico (fenómeno de calentamiento) (Raso *et al.*, 1999), son clasificados como métodos físicos, estos métodos miden macroscópicamente la presión acústica y aumento de temperatura generados debido a los efectos producidos en el líquido y/o medio de propagación.

En el caso de los métodos químicos estos permiten determinar los radicales que se forman después del colapso de las burbujas; algunos de estos métodos se basan en la estimación indirecta del radical OH producido por la cavitación, mediante mediciones de sonoluminiscencia o a través de dosímetros químicos (generación de HNO<sub>3</sub> a partir de NO<sub>3</sub> en agua y la reacción de Weissler que mide la liberación de yodo del yoduro de potasio) (Gogate, 2010; Thompson & Doraiswamy, 1999).

### 1.2.2.3. Influencia de las características del medio sobre la intensidad ultrasónica

La eficiencia global de los procesos sonoquímicos depende de la población de burbujas (número y tamaño de las burbujas), que a su vez dependen de la intensidad de la cavitación y el tipo de cavitación. La intensidad de la cavitación depende de los parámetros ultrasónicos, así como también de las características del medio líquido en el que se propaga. Por lo tanto, es importante comprender la relación entre las características físicas del medio líquido y la intensidad de cavitación. El impacto de la cavitación se encuentra en función de la potencia ultrasónica o de la intensidad aplicada al medio, la cual se expresa en W o W/m<sup>2</sup>, respectivamente. Cuando las ondas ultrasónicas se propagan a través de un medio líquido estas se ven afectas por fenómenos de absorción como lo son las interacciones viscosas o de fricción entre las moléculas del medio en el que se propagan y, por lo tanto, la intensidad ultrasónica depende en gran medida de las propiedades físicas del medio (presión de vapor, viscosidad y tensión superficial) en que se irradia (Lupacchini *et al.*, 2017; Martínez-Ramos *et al.*, 2020).

La intensidad de cavitación o ultrasónica, se ve afectada por la presión de vapor, viscosidad y tensión superficial del medio líquido de propagación. Medios líquidos con bajas presiones de vapor generan pocas burbujas de cavitación, las cuales implosionan con fuerza relativamente mayor, lo que mejora la transferencia de masa en una *interfaz sólido-líquido*. A una alta presión de vapor, la

introducción de gas y/o vapor en las burbujas de cavitación se origina con relativa facilidad y por lo tanto la cavitación es más fácil de producir. No obstante, la cavitación que se produce resulta ser menos violenta, debido a que el gas actúa como amortiguador. En cuanto al efecto de la viscosidad sobre la intensidad de cavitación, las burbujas de cavitación se producen con mayor facilidad, en disolventes con baja viscosidad debido a que la intensidad del ultrasonido aplicada puede superar o irrumpir más fácilmente las fuerzas moleculares del medio líquido. La tensión superficial del medio líquido también influye en la intensidad de cavitación, ya que una baja tensión superficial, se requiere una menor cantidad de energía para producir burbujas de cavitación, por lo tanto, ésta se produce más fácilmente (Esclapez *et al.*, 2011).

#### 1.2.2.4. Sistemas de generación de ultrasonido de alta intensidad

Dentro de la industria alimentaria, el ultrasonido es aplicado para complementar las operaciones unitarias que se llevan a cabo para el procesamiento de un producto alimenticio y la forma más común de producir ultrasonidos consiste en transformar cualquier tipo de energía, en energía acústica, los equipos o sistemas de ultrasonido están conformados por un generador, transductor y emisor. Debido a que en la mayoría de las aplicaciones industriales se utiliza energía eléctrica, el generador convierte la señal eléctrica de la red a otra con la frecuencia y amplitud deseada; el transductor convierte la señal eléctrica de alta frecuencia en vibraciones mecánicas y/o acústicas; y el emisor irradia la energía acústica generada por el transductor al medio a tratar (Brennan & Grandison, 2012). Dentro de los transductores más utilizados a nivel industrial se encuentran los transductores magnetostrictivos y piezoeléctricos. Los transductores magnetostrictivos están hechos de aleaciones metálicas de alta resistencia y son capaces de alcanzar altos niveles de intensidad ultrasónica ( $>150 \text{ W/cm}^2$ ), no obstante no pueden generar frecuencias superiores a los 100 kHz debido a que su eficiencia eléctrica es muy baja. Por lo tanto, la principal desventaja de los transductores magnetostrictivos es la disipación de energía eléctrica en forma de calor, lo cual requiere un costo adicional al tener que incluir un sistema de enfriamiento (Santacatalina Bonet, 2016; Yao *et al.*, 2020). Los transductores piezoeléctricos se basan en la generación de oscilaciones eléctricas, de una frecuencia determinada, sobre las caras de un cristal (cuarzo, materiales cerámicos ferroeléctricos policristalinos), este se contrae o se expande en función de la polaridad de las cargas eléctricas, si se aplica una corriente eléctrica alterna de elevada frecuencia se puede provocar una vibración en el material que conlleva la generación de la onda ultrasónica (Bhargava *et al.*, 2020). Las principales ventajas de los transductores piezoeléctricos es que permiten generar ultrasonidos a potencias elevadas, cubren un amplio rango de frecuencias y presentan un alto factor de conversión de energía. Sus principales desventajas son el desgaste de las cerámicas o cristales debido a la carga de trabajo y la despolarización que sufren debido a las altas temperaturas en las que trabajan (Brennan & Grandison, 2012).

De forma general, los transductores se encuentran conectados a un sistema vibratorio cuya función es transmitir la vibración del transductor al medio. En este sentido, el diseño, geometría y la forma en la cual el transductor se inserta o se fija al recipiente de reacción es de suma importancia para una alta efectividad y eficiencia del ultrasonido. Hay varios sistemas ultrasónicos disponibles, que se diferencian principalmente en el diseño del generador de energía, el tipo de transductor utilizado y el reactor al que está acoplado. Los sistemas de ultrasonidos típicos para medios líquidos son, los ultrasonidos tipo sonda y de baño.

### Equipo de ultrasonido tipo sonda

En los equipos tipo sonda, el ultrasonido se aplica directamente mediante una sonda de vibración, la cual se sumerge en el medio líquido y la punta de ésta irradia una onda acústica, la cual se produce a partir de un generador el cual produce una señal eléctrica a la frecuencia y potencia deseadas, después un transductor transforma la energía eléctrica en acústica, y finalmente una sonda (emisor metálico cilíndrico o cónico) transmite esta energía acústica al medio a tratar. La intensidad de la onda emitida, se puede controlar alterando la potencia suministrada por el generador. El material utilizado para la fabricación de las sondas debe tener una gran resistencia a la fatiga dinámica, bajas pérdidas acústicas y resistencia a la erosión que produce la cavitación. Los materiales más utilizados son diferentes aleaciones de titanio (Yao *et al.*, 2020).

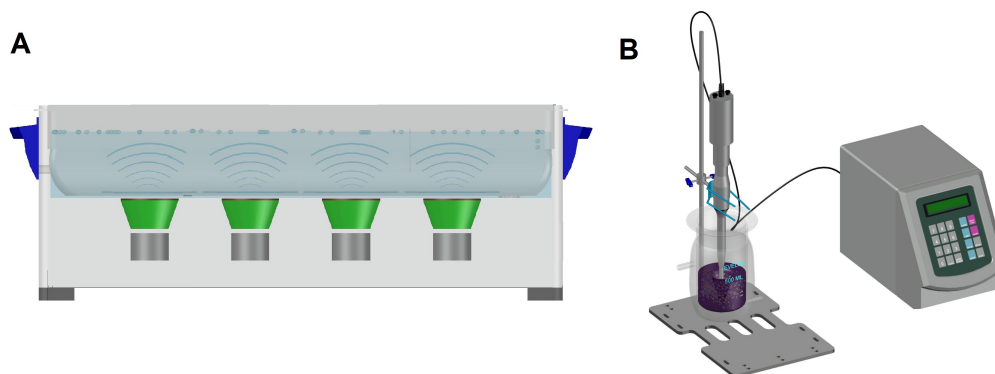


Figura 1.8. Equipo de ultrasonido. Tipo baño (A) y tipo sonda (B).

### Equipo de ultrasonido tipo baño

En el caso del equipo de baño de ultrasonido, este consiste en un tanque de acero inoxidable al que se acoplan transductores en su base. A su vez los transductores van conectados a un equipo electrónico capaz de suministrar la energía eléctrica en las condiciones necesarias (frecuencia e intensidad) para excitarlos. Así, cuando todos ellos vibran transmiten la vibración al recipiente y/o tanque y éste al líquido que contiene. El número de transductores puede ser variable, pero todos

han de vibrar en función del incremento de la cantidad de energía acústica, la cual se produce por unidad de superficie radiante. La potencia generada dependerá principalmente del número de transductores y la frecuencia del tipo de transductor. Sus principales limitaciones son la poca potencia que suministran al medio, la variación del campo acústico dentro del baño y la dificultad en el control de la temperatura (Mulet *et al.*, 2003).

#### **1.2.2.5. Aplicación del ultrasonido de alta intensidad en la industria alimenticia**

Debido a los efectos químicos y físicos que produce el UAI éste tiene diversas aplicaciones en el procesamiento de alimentos, algunas de estas aplicaciones incluyen procesos de extracción, congelación, enfriamiento, deshidratación, secado, escaldado, entre otras (Alvarez *et al.*, 2019; Che-Galicia *et al.*, 2020; Contreras *et al.*, 2018; Kiani & Sun, 2016; Martínez-Ramos *et al.*, 2020; Roohi *et al.*, 2019; Tao *et al.*, 2021; Tian *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2020). Dentro de estas aplicaciones el objetivo de utilizar el ultrasonido de alta intensidad es para intensificar los procesos de transferencia de masa y calor.

Por ejemplo, en el caso de un proceso de extracción, la tecnología tradicional utilizada en ésta operación unitaria es mediante el uso de disolventes, de los cuales se requieren una gran cantidad de éstos ya sea para obtener un extracto completo o separar un compuesto específico de una matriz vegetal. En este sentido, se ha encontrado que, cuando el UAI es aplicado el fenómeno de cavitación (formación, crecimiento y colapso de las burbujas de gas y/o vapor) y las microcorrientes producidas por éste, da como resultado una agitación intensa a pequeña escala la cual facilita la penetración del solvente en la matriz vegetal y/o natural, afectando su integridad mecánica a través de las paredes celulares, lo cual mejora la liberación del contenido intracelular al disolvente de extracción mejorando así la transferencia de masa (Chemat *et al.*, 2017; Fu *et al.*, 2020; Martínez-Ramos *et al.*, 2020). Además, durante un proceso de extracción asistido con UAI no es necesario emplear altas temperaturas, como es el caso de los procesos de extracción convencional lo cual es un factor crítico para facilitar la difusión y permeación del disolvente en la matriz sólida, por lo tanto de esta manera se protegen los compuestos sensibles al calor. El uso del UAI durante un proceso de extracción, permite una mejor recuperación de compuestos con menores tiempos de extracción, temperaturas, volúmenes de disolventes y consumo de energía.

Por otro lado, el procesamiento de alimentos con frecuencia involucra etapas de calentamiento o enfriamiento entre fluidos y materiales sólidos donde la conducción y la convección representan los mecanismos dominantes de transferencia de calor. Para mejorar los procesos, se han propuesto nuevos métodos y tecnologías para mejorar el intercambio de calor y reducir las pérdidas de energía. El UAI ha sido reconocido como una herramienta eficaz para intensificar la transferencia de calor en diferentes procesos alimenticios (secado, enfriamiento, congelación y escaldado) aumentando la eficiencia de éstos. Cuando una onda ultrasónica se propaga en un fluido, se generan cavitación

y transmisión acústica, las cuales mejoran la transferencia de calor (Baffigi & Bartoli, 2012; Legay *et al.*, 2011). Los efectos de la cavitación y colapso de las burbujas cerca la interfaz sólido-fluido pueden reducir la resistencia al flujo local y mejorar la velocidad de transferencia de calor al irrumpir la capa límite del fluido (Nomura *et al.*, 2002). En el caso de la transmisión acústica las corrientes que se producen mejoran la transferencia de calor debido al efecto de mezcla que se produce en la fase fluida (Laborde *et al.*, 2000).

### 1.3. Transferencia de calor en alimentos

Una de los fenómenos más importantes dentro de la industria alimenticia es la transferencia de calor; casi todos los procesos requieren entrada o eliminación de calor para alterar las características físicas, químicas y de almacenamiento de los alimentos. Por ejemplo, al cocinar los alimentos, el aporte de calor logra cambiar las características físicas de éstos, como lo es su textura, color y sabor, en tanto que la eliminación de calor se usa para producir cambios físicos deseables (cristalización) en postres congelados y algunos dulces. Por otro lado, en el almacenamiento de frutas frescas, vegetales, carnes y productos lácteos, el calor se elimina para disminuir la temperatura y así aumentar la vida de almacenamiento. En todas estas aplicaciones, la transferencia de calor se rige por leyes físicas. La comprensión de estos principios físicos permite predecir los fenómenos de calentamiento y/o enfriamiento y así determinar las condiciones de funcionamiento óptimas. Al determinar las condiciones óptimas de operación, se debe tener en cuenta, por supuesto, no solo la velocidad de transferencia de energía sino también la calidad final del alimento.

#### 1.3.1. Ecuación de transferencia de calor

El proceso de calentamiento y/o enfriamiento de un alimento, puede ser descrito por la transferencia de calor en estado no estacionario por conducción y convección. Donde el calor se transfiere desde los alrededores del medio a la superficie del producto y/o alimento por convección y dentro de éste por conducción (Incropera & De Witt, 1999). La ecuación diferencial de transferencia de calor en tres dimensiones para calcular el tiempo de calentamiento y/o enfriamiento en estado no estacionario para distintas geometrías se muestra en la Tabla 1.7. En esta ecuación las propiedades térmicas y físicas (conductividad térmica ( $k$ ), densidad ( $\rho$ ) y calor específico ( $C_p$ )) de los alimentos son independientes de la temperatura y se ven simplificadas en la difusividad térmica (Ecuación 1.9).

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (1.9)$$

La solución de la ecuación diferencial de transferencia de calor se puede desarrollar mediante técnicas analíticas o numéricas, las cuales se encuentran disponibles en la literatura. En estos métodos se obtiene la distribución de la temperatura transitoria, la que además de cambiar con el tiempo, también cambia con la posición, para cada forma geométrica. La solución analítica se obtiene utilizando algunas técnicas de análisis, como la transformada de Laplace y el método de separación de variables (Erdogdu & Turhan, 2008).

Tabla 1.7. Ecuación diferencial de transferencia de calor en diferentes coordenadas geométricas.

<b>Ecuación diferencial de transferencia de calor</b>	
<b>Coordenada</b>	
	$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p T) = \nabla \cdot [k \nabla (T)]$
Rectangular	$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)$
Cilíndrica	$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)$
Esférica	$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \frac{\partial T}{\partial \phi} \right)$

Fuente: Cengel (2006)

El método de separación de variables ha sido ampliamente utilizado en la solución de los problemas de conducción de calor y fue desarrollado por Fourier, en 1820; el cual se basa en el desarrollo de una función en términos de series de Fourier. Este método supone que la variable dependiente (temperatura,  $T$ ) es un producto de las variables independientes (posición,  $x$  ó  $r$  y tiempo,  $t$ ) (Erdogdu & Turhan, 2008).

El método es aplicable si 1) la configuración geométrica es sencilla y finita (como un bloque rectangular, un cilindro o una esfera), de modo que las superficies de frontera se puedan describir por medio de funciones matemáticas sencillas, y 2) la ecuación diferencial y las condiciones de frontera e inicial, en su forma más simplificada, son lineales (sin términos que contengan productos de la variable dependiente o de sus derivadas) y sólo contienen un término no homogéneo (un término sin la variable dependiente ni sus derivadas). Si la formulación comprende varios términos no homogéneos, el problema se puede dividir en un número igual de problemas más sencillos, comprendiendo cada uno sólo un término no homogéneo y, después, combinando las soluciones

por superposición (Cengel, 2006). Las ecuaciones para solucionar la ecuación de transferencia de calor por el método de separación de variables, para distintas geometrías se muestran en la Tabla 1.8.

Tabla 1.8. Soluciones para la conducción transitoria unidimensional en una pared plana de espesor  $2L$ , un cilindro de radio  $r_0$  y una esfera de radio  $r_0$ , sujetos a convección desde todas las superficies.

Geometría	Solución	Las $\lambda_n$ son raíces de
Pared plana	$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4 \operatorname{sen} \lambda_n}{2 \lambda_n + \operatorname{sen}(2 \lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 \tau} \cos(\lambda_n x/L)$	$\lambda_n \tan \lambda_n = Bi$
Cilindro	$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\lambda_n} \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 \tau} J_0(\lambda_n r/r_0)$	$\lambda_n \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0(\lambda_n)} = Bi$
Esfera	$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(\operatorname{sen} \lambda_n - \lambda_n \cos \lambda_n)}{2 \lambda_n - \operatorname{sen}(2 \lambda_n)} e^{-\lambda_n^2 \tau} \frac{\operatorname{sen}(\lambda_n x/L)}{\lambda_n x/L}$	$1 - \lambda_n \cot \lambda_n = Bi$

$\theta = (T - T_{\infty}) / (T_0 - T_{\infty})$  es la temperatura adimensional,  $Bi = hL/k$  o  $hr_0/k$  es el número de Biot,  $F_0 = \tau = \alpha t/L^2$  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.

Fuente: Cengel (2006); Stavros (2008)

Un parámetro adimensional trascendental en la solución de la ecuación de transferencia de calor es el Número de Biot ( $Bi$ ), el cual se define como 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 (Ecuación 1.10) (Singh & Heldman, 2001).

$$Bi = \frac{L_c/k}{1/h} = \frac{hL_c}{k} \quad (1.10)$$

Donde,  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ),  $L_c$  es la longitud característica (volumen/área) y  $k$  es la conductividad térmica ( $\text{W/m } ^\circ\text{C}$ ). Un alto valor de  $Bi$  significa que la resistencia conductiva interior es mayor que la convectiva exterior, por lo cual existirán grandes gradientes de temperatura en el interior de un cuerpo. En cambio si el  $Bi$  es bajo ( $\leq 0.1$ ), la resistencia conductiva es baja (debido a su alta conductividad térmica) y la temperatura en el interior del cuerpo es prácticamente uniforme en cada instante (Baehr & Stephan, 2011).

Para la solución de las ecuaciones diferenciales mostradas en la Tabla 1.7, se necesitan especificar las condiciones iniciales y de contorno o frontera. Las condiciones iniciales brindan información del

rango de temperaturas en todo el medio en el instante  $t=0$ , en tanto que las condiciones de frontera o contorno indican el valor de la temperatura o del flujo de calor en la superficie del cuerpo, éstas se expresan matemáticamente mediante ecuaciones diferenciales o algebraicas cuyas funciones son las variables dependientes (temperatura y flujo de calor).

En problemas de conducción de calor es habitual clasificar las condiciones de contorno de acuerdo con los siguientes tipos:

- **Especificación de la temperatura** (condición de frontera de primer orden). En este caso se especifica cual es la temperatura en la superficie límite considerada, pudiendo ser una función de la posición y el tiempo, o ser constante.

$$T((x,y,z),0) = T_i \quad (1.11)$$

- **Especificación del flujo de calor** (condición de frontera de segundo orden). La distribución o el valor del flujo de calor a través de la superficie límite puede ser especificada como una función del tiempo o un valor constante.

$$\nabla T(0,t) = 0 \quad (1.12)$$

- **Condición de contorno convectiva** (condición de frontera de tercer orden). Esta corresponde a la existencia de calentamiento (o enfriamiento) por convección en la superficie. La ecuación de enfriamiento de Newton establece que el flujo de calor por convección es proporcional a la diferencia entre la temperatura superficial ( $T(X,Y,Z)$ ) y la temperatura del fluido ( $T_m$ ) multiplicado por el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ). La temperatura del fluido puede ser constante o función de la posición y/o del tiempo.

$$-k\nabla T(X,Y,Z) = h[(X,Y,Z),t) - T_m] \quad (1.13)$$

### 1.3.2. Coeficiente de transferencia de calor convectivo

El coeficiente de transferencia de calor convectivo ( $h$ ) muestra las condiciones de transferencia que hay entre la superficie expuesta del alimento y el medio externo que lo rodea. Éste es muy importante para el cálculo del tiempo de congelación, en general, presenta una variabilidad mayor que las propiedades termo-físicas del alimento. En el proceso de congelación, la transferencia de calor depende de la velocidad del fluido externo, la geometría del alimento, así como la rugosidad de la superficie expuesta del alimento, entre otros factores (Delgado & Sun, 2001).

Actualmente, no hay suficiente información sobre la simulación y el modelado del proceso de enfriamiento y/o congelación por inmersión asistido con UAI. Los estudios existentes han demos-

trado que la aplicación del ultrasonido puede mejorar la velocidad de transferencia de calor por convección, esto debido al fenómeno de cavitación y las microcorrientes generadas por el movimiento de las burbujas (Guo *et al.*, 2021; Kiani & Sun, 2011,1; Kiani *et al.*, 2013b; Zhu *et al.*, 2020). Algunos de estos autores han utilizado métodos analíticos para evaluar el proceso de transferencia de calor, utilizando materiales como el cobre, con los cuales se espera que ocurra un régimen de transferencia de calor concentrado ( $Bi \leq 0.1$ ); en el caso de los alimentos, tanto la resistencia interna ( $1/\text{conductividad térmica}$ ) como la externa ( $1/\text{coeficiente de transferencia de calor por convección}$ ) a la transferencia de calor, juegan un papel importante durante el proceso de transferencia de calor, ya que las propiedades termo-físicas de éstos varían a lo largo del proceso, y por lo tanto, el valor del coeficiente de transferencia de calor es más difícil de estimar. Al utilizar un material con alta conductividad térmica, se elimina y/o disminuye el efecto la conductividad térmica. A través de un método analítico se obtiene un valor promedio para el coeficiente de transferencia de calor por convección. Sin embargo, aun no se cuentan con estudios que evalúen la transferencia de calor por convección y conducción durante los procesos de intercambio de energía de un sólido a un fluido, asistidos con UAI.

Por otro lado, existen otro tipo de herramientas matemáticas que sirven para predecir el valor del  $h$ , como lo son las correlaciones empíricas las cuales son obtenidas mediante el ajuste de datos experimentales y se utilizan ampliamente para calcular el valor del coeficiente de transferencia de calor en distintas aplicaciones (Kwon *et al.*, 2020; Lei *et al.*, 2019; Schatte *et al.*, 2016; Taler, 2016; Wen *et al.*, 2018). Estos modelos se seleccionan en función de las características del proceso, incluido el régimen del flujo, la configuración geométrica y el rango de los números adimensionales (Reynolds, Prandtl, Grashof, etc.) en el que se desarrollaron. El flujo a través de cilindros y esferas ha sido estudiado de manera experimental y se han desarrollado varias correlaciones empíricas para la determinación del  $h$  (Ecuación 1.14), en la convección forzada suele estimarse mediante el uso de correlaciones que relacionan a los números adimensionales de Nusselt ( $Nu = f(Re, Pr)$ ), Reynolds (Ecuación 1.15) y Prandtl (Ecuación 1.16).

$$h = \frac{NuL_c}{k} \quad (1.14)$$

$$Re = \frac{\rho v L_c}{\mu} \quad (1.15)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (1.16)$$

donde,  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) es la densidad del medio de congelación,  $v$  (m/s) velocidad de la corriente alrededor de la muestra,  $L_c$  (m) longitud característica,  $\mu$  (Pa s) viscosidad del medio de congelación,  $C_p$  (J/kg K) calor específico del medio de congelación y  $k$  (W/m K) conductividad térmica del me-

dio de congelación. Un resumen de estas ecuaciones y el rango de los números de  $Re$  y  $Pr$  dentro de los cuales las ecuaciones son válidas se muestran en la Tabla 1.9.

Tabla 1.9. Ecuaciones adimensionales usadas para la estimación del número de  $Nu$ , para la transferencia de calor desde una esfera y cilindro circundante.

Geometría	Correlación	Rango $Pr$ y $Re$	Referencia
Esfera	$Nu = 2 + \left( \left[ 0.4Re^{0.5} + 0.06Re^{2/3} \right] Pr^{0.4} \right)$	(1.17) $0.7 \leq Pr \leq 380$ $1 \leq Re \leq 8 \times 10^4$	Whitaker (1972)
	$Nu = 2 + 0.47Re^{0.5} Pr^{0.36}$	(1.18) $3 \times 10^{-3} \leq Pr \leq 1$ $3 \times 10^2 \leq Re \leq 5 \times 10^4$	Melissari & Argyropoulos (2005)
	$Nu = 2 \left[ 1 + 0.276Re^{0.5} Pr^{1/3} \right]$	(1.19) $Pr > 0.7$ $Re < 10^4$	Froessling (1958)
	$Nu = 1.13 (RePr)^{0.5}$	(1.20) $Pr < 1$ $Re \leq 2 \times 10^5$	(Sideman, 1966)
Cilindro	$Nu = 0.3 + \frac{0.62Re^{0.5} Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \left[ 1 + \left( \frac{Re}{282000} \right)^{5/8} \right]^{4/5}$	(1.21) $PrRe \geq 0.2$	Churchill & Bernstein (1977)
	$Nu = \left( 0.4Re^{1/2} + 0.06Re^{2/3} \right) Pr^{0.4}$	(1.22) $0.67 \leq Pr \leq 300$ $1.0 \leq Re \leq 1.0 \times 10^5$	Whitaker (1977)

Para los procesos de convección natural y forzada, se ha demostrado que el uso del UAI puede aumentar el valor del coeficiente de transferencia de calor (Li *et al.*, 2016; Poncet *et al.*, 2021; Wan *et al.*, 2020); sin embargo, solo se han desarrollado unas pocas correlaciones que incorporan el efecto del ultrasonido (Cai *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2018a; Kiani *et al.*, 2013a). El desarrollo de estas correlaciones pueden ser útiles para analizar el efecto del ultrasonido para el diseño y optimización de los procesos o para el desarrollo de nuevas aplicaciones.

## II. JUSTIFICACIÓN

Los avances recientes en la aplicación del ultrasonido de alta intensidad en operaciones que involucran transferencia de calor a bajas temperaturas han ayudado a diversificar su aplicación como una técnica que contribuye a la mejora de la calidad de los alimentos bajo estas condiciones. Sin embargo, el uso del ultrasonido no puede generalizarse simplemente para satisfacer las demandas de calidad de los productos, sino que deben entenderse, mejorarse y optimizarse los procesos, por lo que los protocolos experimentales de aplicación y de ejecución deben diseñarse para adaptarse a una aplicación específica. Es así como la comprensión de las propiedades fisicoquímicas, las propiedades funcionales de un alimento específico, las térmicas y acústicas y sus interacciones o relación existente entre ellas, deben contribuir a guiar la selección del sistema de procesamiento o uso adecuado del ultrasonido de manera que sea apropiado en términos de diseño, rendimiento y ahorro energético, de manera que brinden resultados óptimos para la aplicación industrial de los alimentos. En este contexto, aún existe la necesidad de poder evaluar a profundidad el impacto que el ultrasonido de alta intensidad tiene sobre el fenómeno de transferencia de energía y sus efectos físicos en los alimentos tratados a bajas temperaturas para su conservación, por lo que el impulso para realizar la presente tesis ha sido el poder dilucidar el entendimiento y comprensión del rol que juegan las variables del proceso y sus funciones, para proponer protocolos experimentales que permitan la simplificación en el diseño y optimización de procesos asistidos con ultrasonido en operaciones que involucren transferencia de calor a bajas temperaturas.

# III.HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

## 3.1. Hipótesis

El estudio de la relación que existe entre las variables de transferencia de energía y acústicas en procesos térmicos asistidos con ultrasonido de alta intensidad a bajas temperaturas, permite describir de una mejor manera el fenómeno de transferencia de calor con ultrasonido y con ello facilitar el diseño y optimización de dichos procesos.

## 3.2. Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación del ultrasonido de alta intensidad sobre el proceso de transferencia de energía y del mecanismo de nucleación durante la congelación por inmersión de diferentes matrices alimenticias, así como su influencia sobre las propiedades fisicoquímicas de éstas.

## 3.3. Objetivos específicos

- Evaluar la distribución de la actividad cavitacional durante el enfriamiento por inmersión asistido con UAI mediante la determinación de la intensidad ultrasónica y su efecto sobre el coeficiente de transferencia de calor convectivo.
- Analizar el proceso de enfriamiento por inmersión asistido con ultrasonido mediante la modelación de la transferencia de calor por convección para el desarrollo de una correlación empírica.
- Evaluar el efecto del ultrasonido de alta intensidad sobre el inicio de la nucleación y tiempo de congelación de diferentes matrices alimenticias.
- Evaluar la influencia de la aplicación del UAI, sobre las propiedades fisicoquímicas de diferentes matrices alimenticias antes de su congelación y posterior descongelación.

# IV.METODOLOGÍA

## 4.1. Plan de trabajo

El plan de trabajo de la presente tesis doctoral (Figura 4.1) se elaboró en base a los objetivos planteados en el apartado anterior (Capítulo 2), en el cual la programación experimental se organizó en tres secciones principales.

La primera sección comprende la determinación de la distribución de la actividad cavitacional en función de la intensidad ultrasónica ( $IU$ ) disipada al medio de inmersión y del valor calculado experimentalmente del coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ). Para ello, la  $IU$  fue calculada a partir de la  $P_{US}$ , la cual se determinó en distintas posiciones dentro del baño ultrasónico, evaluando también su eficiencia calorimétrica ( $\eta$ , %). Posteriormente, se calculó experimentalmente el valor de  $h$  del proceso de enfriamiento por inmersión asistido con UAI en una muestra de esfera de cobre, mediante el uso de una solución analítica a las mismas posiciones en que la  $IU$  fue evaluada. Así, se analizó la correlación existente entre el valor de la  $IU$  y el valor de  $h$ , valorando la relación de mejora ( $Er$ ; %), su incremento (HTI) y el factor de mejora ( $Ef$ ) de la transferencia de energía. Asimismo, se analizó el comportamiento de la onda acústica, es decir, su longitud de onda ( $\lambda$ ) y amplitud, y se estudió su influencia sobre la  $IU$  y el  $h$ . Por último, el valor del  $h$  obtenido a través de la solución analítica fue validado en muestras de distinto material y geometría.

En la segunda sección, se realizó un análisis de la transferencia de calor por convección asistida con UAI. Se propuso un modelo de transferencia de calor con un término de fuente para calcular experimentalmente el valor del coeficiente de transferencia de calor durante el enfriamiento/calentamiento asistido con UAI, utilizando diferentes parámetros de procesamiento, los cuales incluyen diferentes geometrías de cobre, temperaturas del medio de inmersión, velocidades del medio de inmersión y potencias ultrasónicas. Se ha demostrado que el ultrasonido puede intensificar la transferencia de calor en diferentes procesos en donde es aplicado. Por lo tanto, a partir de los valores experimentales obtenidos de  $h$ , se desarrolló una nueva correlación de Nussetl ( $Nu$ ), la cual incluye un término que representa el efecto que el ultrasonido tiene sobre un proceso de transferencia de calor por convección en un medio líquido. Una vez obtenida la correlación, ésta fue validada en otros medios de inmersión con distintas condiciones de procesamiento. Por último, la correlación de  $Nu$  propuesta fue aplicada para el análisis de las cinéticas del calentamiento asistido con ultrasonido a tiempos cortos y temperaturas moderadas en muestras obtenidas de jamón curado, a partir de datos previamente reportados en la literatura.

Finalmente en la tercera sección se evaluó el efecto del UAI sobre el tiempo de congelación, inicio de la nucleación y propiedades fisicoquímicas (color, firmeza, contenido fenólico total y

capacidad antioxidante) de diferentes matrices alimenticias (jicama, papa y betabel). Se evaluó el efecto del UAI sobre los tiempos de congelación en diferentes matrices alimenticias, mediante el análisis del comportamiento de las curvas de congelación en las diferentes etapas del proceso. Para el caso del estudio del fenómeno de nucleación se llevaron a cabo procesos de congelación controlando los tiempos de irradiación ultrasónica, previos a la etapa de cambio de fase de la matriz en estudio. Además se evaluaron las propiedades fisicoquímicas de las matrices alimenticias previo al proceso de congelación y su posterior descongelación, esto con el fin de observar el impacto que el UAI pudiera tener sobre la calidad final de las muestras.

En las siguientes secciones de este apartado se describe con más detalle la metodología empleada, los materiales y/o materia prima, así como los equipos y ecuaciones matemáticas utilizadas en cada una de las experimentales planteadas para el cumplimiento de los objetivos del presente trabajo.

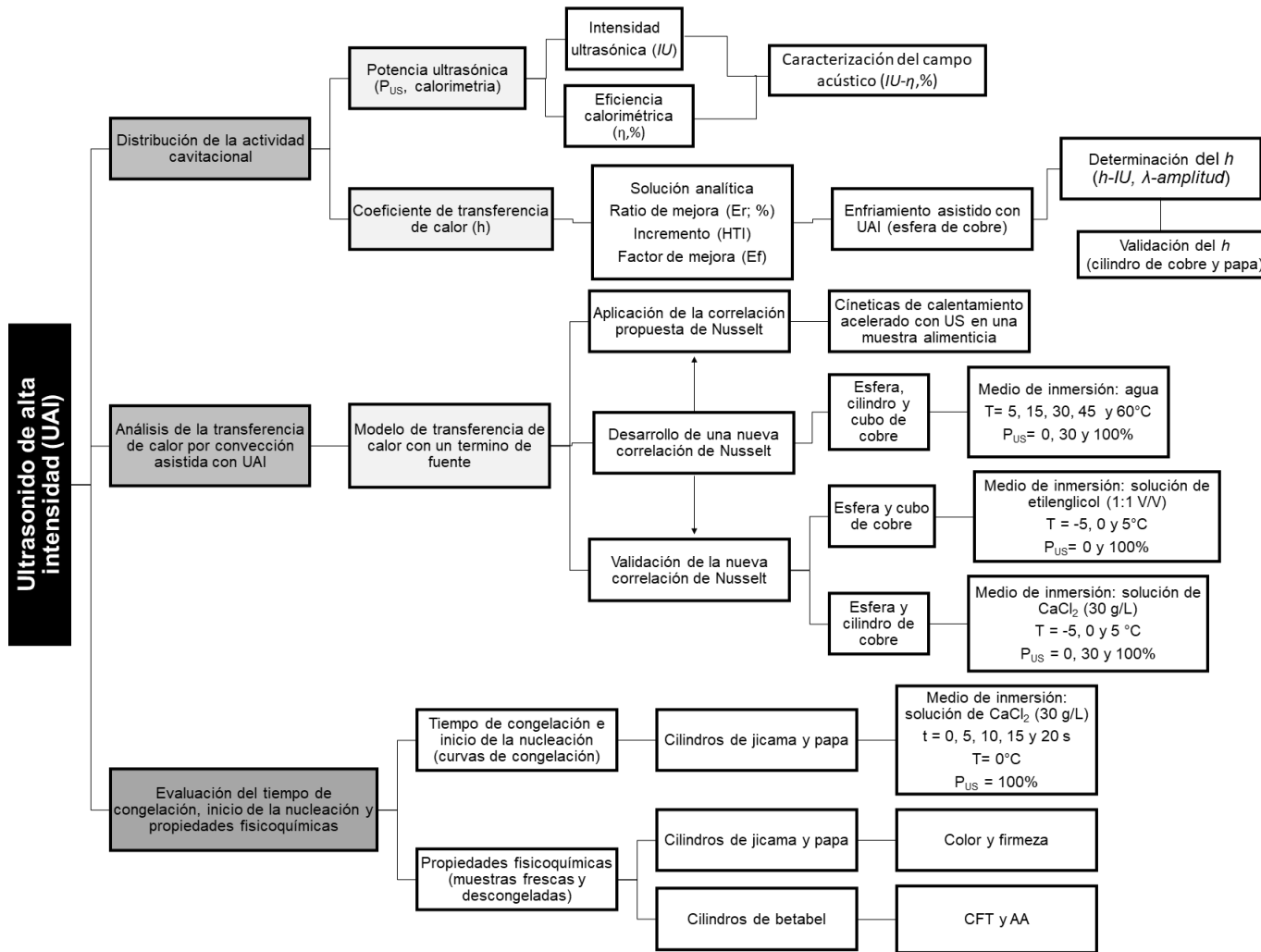


Figura 4.1. Plan de trabajo

## 4.2. Montaje experimental

Los procesos de enfriamiento/calentamiento y congelación asistida con UAI se llevaron a cabo en un baño de ultrasonido (Model P 70 H, *Elmasonic*, Alemania), el cual opera a una frecuencia de 37 kHz y con una potencia de salida de 880 W. El baño de ultrasonido consiste de un tanque de acero inoxidable de forma rectangular con dimensiones internas de 100 mm × 137 mm × 505 mm (profundidad × ancho × largo) y equipado con cuatro transductores pizoeléctricos acoplados en su base (Figura 4.2).

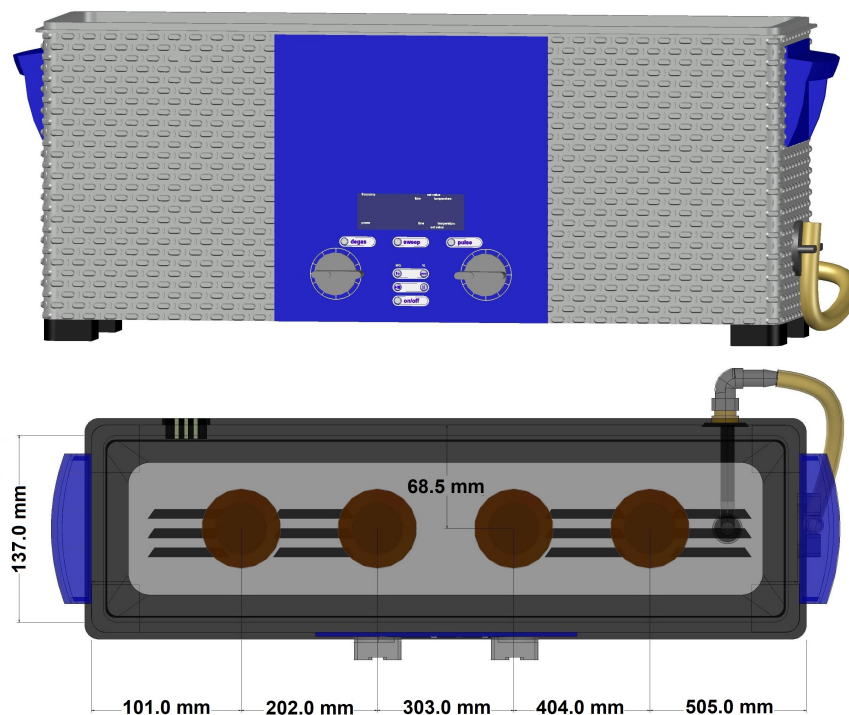


Figura 4.2. Baño de ultrasonido de alta intensidad (37 kHz, 880 W de potencia de salida).

### 4.2.1. Curvas de enfriamiento/calentamiento

El efecto de la aplicación del ultrasonido sobre la transferencia de calor por convección se evaluó con diferentes geometrías de cobre ( $k = 406 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $C_p = 385 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 8941 \text{ kg/m}^3$ ) sumergidas en un fluido. Los cuales constaron de un cubo (0.02 m de lado), una esfera (0.02 m de diámetro) y un cilindro (0.03 m de longitud y 0.02 m de diámetro). El montaje utilizado para realizar los experimentos de enfriamiento/calentamiento asistido con ultrasonido se muestra en la Figura 4.3.

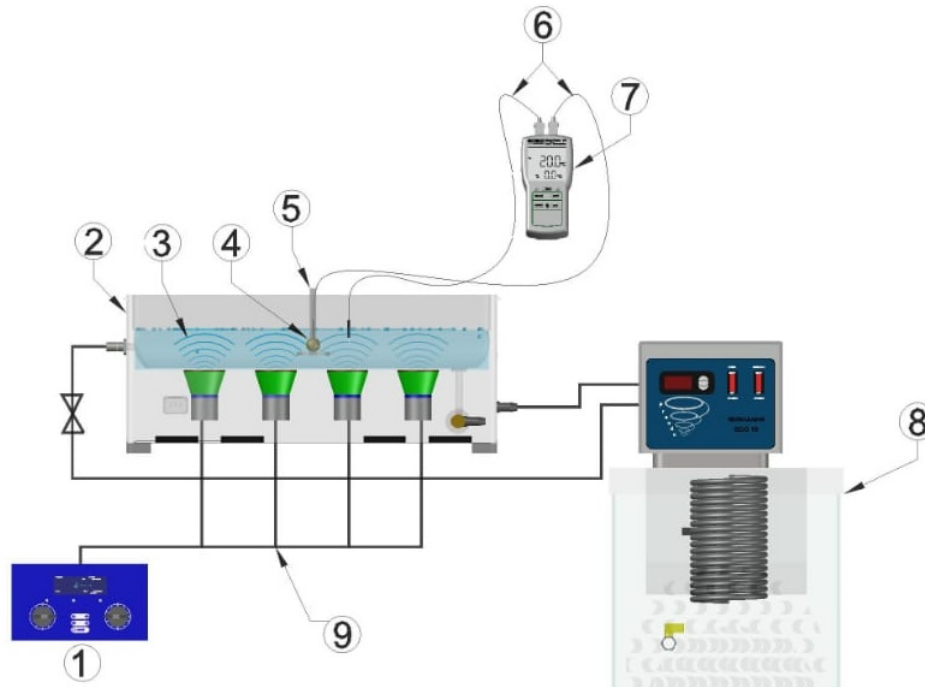


Figura 4.3. Montaje experimental del enfriamiento/calentamiento y/o congelación asistida con UAI. 1.Generador de ultrasonido (37 kHz, 880 W), 2.Tina de ultrasonido de acero inoxidable, 3.Medio de inmersión, 4.Muestra, 5.Portamuestra de acero inoxidable, 6.Termopar tipo K, 7.Medidor de temperatura, 8.Sistema de refrigeración, 9.Transductores piezoeléctricos.

La medición del cambio de temperatura se realizó a través de una sonda termopar (tipo K, TP870, Extech Instruments, Estados Unidos) la cual fue insertada en el centro geométrico de las figuras sólidas antes mencionadas, a través de una perforación que se realizó en dirección perpendicular a las caras de la superficie cuadrada y lateral en las geometrías de cubo y cilindro. Una pasta térmica (MGZ-NDSG-N15M-R1, Cooler Master, China) fue utilizada para rellenar los espacios de aire en los orificios de la perforación, con el fin de obtener una transferencia de calor más eficiente entre el termopar y la figura de cobre. El termopar y las figuras de cobre se mantuvieron en una posición fija utilizando un portamuestras de acero inoxidable; durante los experimentos la figura de cobre junto con el termopar fueron colocados a diferentes alturas por encima del área de transducción, respecto al centro geométrico de la figura. La temperatura de las figuras de cobre se registró cada segundo mediante un medidor de temperatura (EA10, Extech Instruments, Estados Unidos). La temperatura inicial de las muestras se fijó a  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y luego éstas fueron sumergidas, el cambio de temperatura se registró hasta que la temperatura del centro geométrico de la muestra fuera igual a la temperatura del medio de inmersión. La irradiación con ultrasonido se inició antes de

sumergir las figuras de cobre en el baño del ultrasonido. Para controlar la temperatura del medio de enfriamiento/calentamiento se utilizó un baño recirculador (ECO 10, SEV-PRENDO, México). Los experimentos de enfriamiento/calentamiento de diferentes geometrías de cobre se realizaron con y sin aplicación del ultrasonido. Cada experimento se llevó a cabo por triplicado. Los experimentos de transferencia de calor se realizaron utilizando tres fluidos diferentes se la siguiente manera: agua, una mezcla de etilenglicol-agua (1: 1 V/V) y una solución acuosa de  $\text{CaCl}_2$  (30 g/L).

#### 4.2.2. Curvas de congelación

El efecto del tiempo de aplicación del ultrasonido sobre diferentes matrices alimenticias durante su proceso de congelación fue evaluado. Las matrices alimenticias utilizadas para la congelación asistida con ultrasonido fueron papa (*Solanum tuberosum* L.), jicama (*Pachyrhizus erosus*) y betabel (*Beta vulgaris*), las cuales fueron obtenidas en un supermercado local y seleccionadas de acuerdo a un tamaño uniforme, cáscara suave, brillante y no maltratada, preservando su interior de manera adecuada. Todas las muestras fueron cortadas en cilindros (0.02 m de diámetro y 0.03 m de longitud) con ayuda de un sacabocados. En cuanto a la composición química (Tabla 4.1) de las muestras, ésta se estimó de acuerdo a la base de datos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (en inglés, United States Department of Agriculture, USDA).

Tabla 4.1. Composición química de la papa, jicama y betabel

Composición	Fracción masa ( $x_i$ )		
	Papa	Jicama	Betabel
Sólidos totales	0.18	0.14	0.15
Agua	0.82	0.86	0.85
Carbohidratos	0.15	0.08	0.09
Proteína	0.02	0.01	0.02
Fibra		0.01	0.03
Ceniza	0.01	0.04	0.01

Para esta experimental una solución de  $\text{CaCl}_2$  (30 g/L) a  $-10^\circ\text{C}$  se utilizó como medio de inmersión, controlando la temperatura como se mencionó anteriormente y recirculando la solución al baño de ultrasonido con un flujo de  $4 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . Durante el proceso de congelación las muestras fueron colocadas a 25 mm de altura por encima del área de transducción respecto al centro geométrico de las muestras. La temperatura inicial de las muestras se fijó a  $20^\circ\text{C}$  y luego éstas fueron sumergidas, para el registro de cambio de temperatura. El ultrasonido fue aplicado cuando la temperatura en el centro geométrico de las muestras alcanzó los  $0^\circ\text{C}$  e inmediatamente fue irradiado durante 5, 10, 15 y 20 s. Las curvas de congelación se realizaron con y sin aplicación del ultraso-

nido. Una vez completada la congelación, las muestras congeladas se colocaron en una caja Petri a una temperatura de 20°C y se dejaron descongelar naturalmente. Para cada experimento realizado se llevaron a cabo tres repeticiones.

### 4.3. Determinación de la potencia ultrasónica e intensidad ultrasónica

La potencia ultrasónica ( $P_{US}$ ) disipada al medio de inmersión, puede cambiarse a diferentes niveles mediante el ajuste de la energía de salida del generador del equipo acústico. Sin embargo, debido a las pérdidas que ocurren en el sistema ultrasónico (conversión de energía eléctrica a energía acústica), la potencia ultrasónica real disipada en el medio de inmersión será menor que la potencia de salida (Li & Sun, 2002). Debido a lo anterior, con el fin de caracterizar la potencia ultrasónica real aplicada, se procedió a realizar una metodología de calorimetría, la cual asume que toda la energía suministrada al sistema se disipa en forma de calor, por lo tanto, su determinación consistió en registrar el incremento de la temperatura del medio de inmersión que tiene lugar durante la aplicación del ultrasonido (Cheng *et al.*, 2014; Raso *et al.*, 1999) (Ecuación 4.1)

$$P_{US} = \rho_{\infty} \varepsilon V C p_{\infty} \frac{dT}{dt} \quad (4.1)$$

donde  $P_{US}$  es la potencia ultrasónica entregada al medio de inmersión (W),  $\rho_{\infty}$  y  $C p_{\infty}$  son la densidad ( $kg/m^3$ ) y calor específico ( $J/kg^{\circ}C$ ) del medio de inmersión, respectivamente,  $\varepsilon$  es la fracción de volumen ocupada por el fluido y  $V$  es el volumen ( $m^3$ ) y  $dT/dt$  es la pendiente de la cinética de temperatura-tiempo obtenida experimentalmente. Asimismo, se calculó la eficiencia calorimétrica (Mhetre y Gogate, 2014) y está dada por la Ecuación 4.2.

$$\eta (\%) = \frac{P_{US}}{E_t} \times 100 \quad (4.2)$$

donde  $E_t$  es la potencia eléctrica suministrada (W).

La intensidad ultrasónica se determinó de acuerdo a la Ecuación 4.3:

$$IU = \frac{P_{US}}{\sigma} \quad (4.3)$$

donde  $IU$  es la intensidad ultrasónica ( $W/m^2$ ),  $\sigma$  es la superficie del área de transducción ( $m^2$ ). El cambio de la temperatura del medio de inmersión, se registró cada segundo durante la aplicación del ultrasonido (en este caso 180 s), mediante una sonda termopar tipo K conectada a un equipo de adquisición de datos (Figura 4.4).

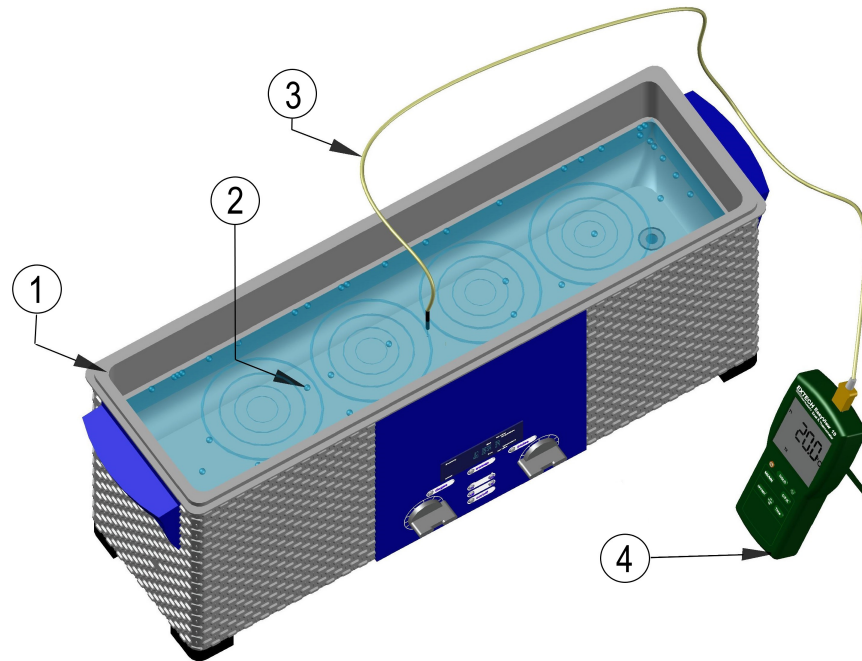


Figura 4.4. Montaje experimental para la calorimetría. 1. Baño de ultrasonido, 2. Medio de inmersión, 3. Termopar tipo K, 4. Medidor de temperatura.

## 4.4. Métodos analíticos

Las propiedades físico-químicas de distintas matrices alimenticias, antes de la congelación por inmersión y su posterior descongelación fueron evaluadas mediante diferentes metodologías analíticas. A continuación se describen los métodos analíticos utilizados en el presente trabajo.

### 4.4.1. Color

Para determinar el color de las muestras, se utilizó un colorímetro (ColorFlex 45°/0°. HunterLab. Estados Unidos), llevándose a cabo el análisis mediante el método descrito por Savadkoohi *et al.* (2014), donde se midió la superficie de la muestra. La luminosidad  $L^*$ , las coordenadas de color  $a^*$  y  $b^*$ , así como las diferencias de color ( $\Delta E^*$ ) con respecto a la muestra fresca (Ecuación 4.4), el croma  $C^*$  (Ecuación 4.5) y el tono  $h^\circ$  (Ecuación 4.6), fueron determinados. Todas las mediciones se realizaron por triplicado.

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (4.4)$$

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (4.5)$$

$$h^{\circ} = \tan^{-1} \left( \frac{b^{*}}{a^{*}} \right) \quad (4.6)$$

#### 4.4.2. Firmeza

La firmeza se midió utilizando un analizador de textura (TA–XT2i, Stable Micro System. Inglaterra), con la ayuda de una navaja Warner-Bratzler de 3 mm de espesor en forma de V, acoplada al equipo de textura como lo describe el método utilizado por Caine *et al.* (2003), las muestras fueron colocadas en la base del soporte. De esta manera se evaluó la firmeza al corte empleando una velocidad de pre-prueba 2 mm/s, una velocidad de prueba de 2 mm/s y una velocidad de retroceso de 10 mm/s con una celda de carga de 5 kg y una fuerza de disparo de 5 g. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado para cada muestra.

#### 4.4.3. Contenido fenólico total (CFT)

Se extrajeron 8 g de muestra y fueron homogeneizadas con etanol acuoso al 50% en una parrilla de agitación durante una hora a una temperatura de 25°C. La mezcla se centrifugó a 1350xg durante 15 min a 4°C, el sobrenadante se filtró a través de papel whatman 1. Todas las extracciones se realizaron por triplicado.

El contenido fenólico total fue determinado por el método colorimétrico Folin-Ciocalteu (Sekhon-Loodu *et al.*, 2013; Xu *et al.*, 2015). En un matraz aforado de 10 mL se mezclaron en el siguiente orden 100 µL del extracto, 2 mL de agua desionizada y 200 µL de reactivo Folin–Ciocalteu. Luego éstos se dejaron reposando a temperatura ambiente durante 3 min. Enseguida se añadió a la mezcla 1 mL de carbonato de sodio al 20%; se agitó la mezcla y se dejó reposar durante 60 min en la oscuridad, por último, la absorbancia fue medida a 765 nm. Se realizó una curva de calibración para el estándar ácido gálico y los resultados se expresaron en miligramos equivalentes de ácido gálico/100 g de peso fresco, es decir, mg GAE/100 g m.f. El análisis para cada tratamiento se realizó por triplicado.

#### 4.4.4. Capacidad antioxidante (CA)

La CA se determinó a partir de los ensayos ABTS, DPPH y FRAP, las cuales se describen a continuación:

- ABTS (Ácido 2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina)-6-sulfónico). La CA se cuantificó mediante la técnica descrita por Butkhuip *et al.* (2013). Para ello, diluyó el ABTS en agua a una concentración 7 mM. Posteriormente, se formó el radical ABTS\* preparando una disolución 2.45 mM de persulfato potásico (el persulfato potásico se diluyó en el ABTS 7 mM)

dejándose en incubación durante 18 horas a temperatura ambiente y en la oscuridad. Una vez formado el radical ABTS\*, éste se diluyó en etanol hasta obtener un valor de absorbancia  $0.700 \pm 0.100$  a 734 nm. En seguida se realizaron las lecturas de las muestras, para lo cual se tomaron 100  $\mu$ L de extracto y se le agregaron 900  $\mu$ L de ABTS midiéndose la absorbancia a 734 nm. Los resultados fueron expresados en mg Trolox/100 g de muestra fresca. Los análisis se realizaron por triplicado.

- DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl). El ensayo de DPPH se realizó de acuerdo a la técnica descrita por Dubie (2013). Para la formación del radical DPPH, se preparó una solución disolviendo 4 mg de DPPH en 100 mL de etanol absoluto. Se evaluó la absorbancia inicial (515 nm) después de 30 min de haber preparado el radical DPPH. En cuanto a la cuantificación de la actividad antioxidante, en un tubo de ensayo se mezcló 1.5 mL del radical DPPH con 1.5 mL del extracto o muestra, se cuantificó a los 30 min de reacción. Los tubos se dejaron reposando en la oscuridad a temperatura ambiente. La absorbancia fue leída a 515 nm. Los resultados fueron expresados en mg Trolox/100 g de muestra fresca. Los análisis se realizaron por triplicado.
- FRAP (Ferric-Reducing Ability Power). La CA se cuantificó de acuerdo a la metodología descrita por Thaipong *et al.* (2006). Para la preparación del radical FRAP se elaboraron tres reactivos; acetato de sodio anhidro (0.3M) con un pH entre 3.6 y 3.7, 0.312 g de reactivo TPTZ el cual se disolvió en ácido clorhídrico al 37% y por último, se preparó cloruro férrico, para ello, se pesaron 0.5433 g de reactivo y se disolvieron en 100 mL de agua destilada. Los tres reactivos preparados se mezclaron en la misma proporción y en el orden en que fueron mencionados para obtener el radical FRAP. Una vez obtenido este radical, en un tubo de ensayo se añadieron 30  $\mu$ L de agua destilada, 30  $\mu$ L de extracto o muestra y 900  $\mu$ L de radical FRAP. El tubo con la mezcla se sometió a un baño con agua a 37°C durante 30 min. Finalmente las muestras se leyeron a una absorbancia de 595 nm. Todos los análisis se realizaron por triplicado y los resultados fueron expresado en mg Trolox/100 g de muestra fresca.

## 4.5. Análisis estadístico

En el presente trabajo se utilizaron diferentes herramientas matemáticas para evaluar la confiabilidad de los datos experimentales. Así, se realizaron regresiones no lineales robustas y análisis estadísticos a través del software MATLAB y su Statistic Toolbox 7.3 (versión R2012a, MathWorks Inc., EE. UU.). La calidad de los ajustes de los modelos propuestos se cuantificó mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la desviación relativa media (MRD, por sus siglas en ingles). La

significancia estadística de los parámetros no lineales estimados fue evaluada a través del 95 % de intervalo de confianza. Asimismo, correlaciones de Pearson ( $r$ ) fueron evaluadas para determinar la relación lineal entre variables. Finalmente grupos homogéneos fueron determinados a través de la prueba de Tukey con un intervalo de confianza del 95 %.

# V.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 5.1. Evaluación de la distribución del campo acústico y su impacto en el coeficiente de transferencia de calor por convección durante el enfriamiento asistido por ultrasonido.

Actualmente el ultrasonido ha sido reconocido como un método de transferencia de calor eficaz que puede ser utilizado en varios procesos como el escaldado, secado, congelación y enfriamiento (Delgado & Sun, 2001; Fu *et al.*, 2020; Gao *et al.*, 2018; Kiani *et al.*, 2015; Tao *et al.*, 2021), que por lo general, se llevan a cabo utilizando sistemas indirectos de aplicación del ultrasonido como lo son los equipos de baño, los cuales tienen uno o más transductores acoplados a un tanque de acero inoxidable. Sin embargo, la intensidad del campo acústico dentro de este tipo de equipos no se distribuye homogéneamente ya que existen zonas activas y pasivas (alta y baja intensidad) (Rao & Rathod, 2015), por lo que una evaluación previa de la distribución de la energía del campo acústico puede contribuir a obtener una mayor eficiencia del proceso en donde es aplicado el ultrasonido. Por lo tanto, en el presente apartado se planteó como objetivo, el evaluar la distribución del campo acústico mediante el registro de la intensidad ultrasónica y su impacto en el coeficiente de transferencia de calor por convección. Para alcanzar dicho objetivo, se planteó una solución analítica para el cálculo del coeficiente de transferencia de energía durante el proceso de enfriamiento asistido con irradiación ultrasónica en una muestra de esfera de cobre estacionaria. A continuación se presentan los resultados alcanzados para el objetivo anteriormente planteado.

### 5.1.1. Caracterización del campo acústico

Debido a que la cantidad de energía que llega a la muestra que es irradiada en un baño de ultrasonido depende en gran medida de su ubicación dentro de éste, es necesario determinar cual es la posición y altura por encima del área de transducción más adecuada. Para ello, se determinó la distribución del campo acústico, estimando tanto la intensidad ultrasónica ( $IU$ ) (Ecuación 4.3) como la eficiencia calorimétrica ( $\eta$ ; %) (Ecuación 4.2) para 3 posiciones y 3 alturas por encima del área de transducción (25, 40 y 55 mm ) dentro del baño de ultrasonido (Figura 5.1).

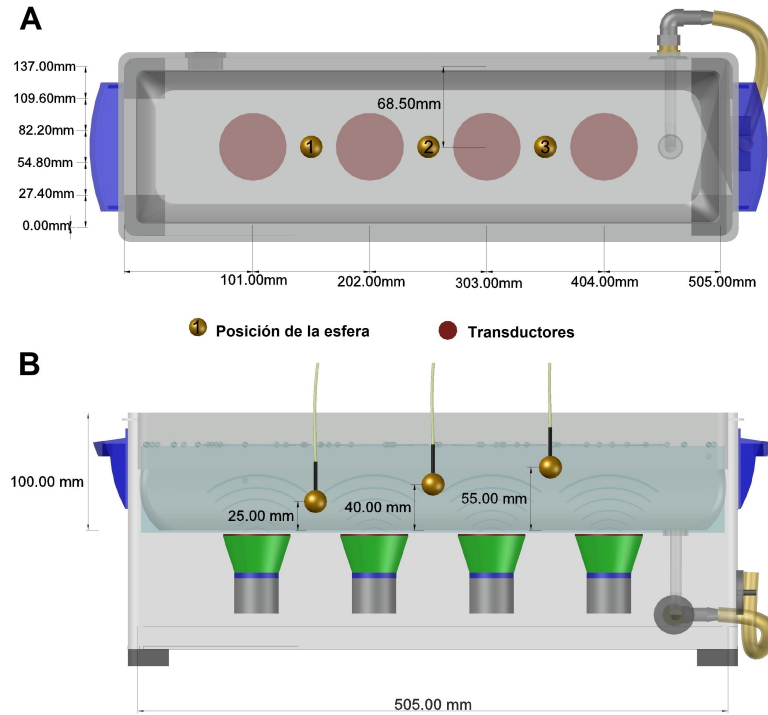


Figura 5.1. Representación esquemática de la disposición de la esfera de cobre dentro del baño de ultrasonido: (A) vista superior y (B) vista transversal.

En la Tabla 5.1, se muestran los valores de  $IU$  y ( $\eta$ ; %), obtenidos para cada posición y altura. Los resultados mostraron que para una sola posición, que a medida que aumenta la altura por encima del área de transducción el valor de la  $IU$  disminuyó significativamente ( $p < 0.05$ ) y por lo tanto, su eficiencia de cavitación también. Para la posición 1 y 3, los valores más altos de  $IU$ , se obtuvieron para la distancia más cercana (25 mm) a el área de transducción, con valores de  $2755.4 \pm 97.4$  y  $2755.4 \pm 54.0 \text{ W/m}^2$ , respectivamente. En un baño de ultrasonido, las zonas activas se restringen a un plano vertical justo por encima del área de transducción, en este sentido, se ha reportado que la  $IU$  es mayor en dicho plano, es decir, en la dirección axial, mientras una menor  $IU$  se ha alcanzado en un plano horizontal es decir, en la dirección radial (Gogate *et al.*, 2002; Kulkarni & Rathod, 2014). Por lo tanto, la mayor actividad cavitacional se encuentra cerca de la superficie del área de transducción, por lo que la intensidad ultrasónica tiende a disminuir a medida que las ondas de ultrasonido se alejan del transductor y del eje que pasa por la dirección central (Gogate, 2010). Esto puede explicar los resultados de la eficiencia calorimétrica del presente estudio como se muestra en la Tabla 5.1, donde las posiciones 1 y 3 a una altura de 25 mm, mostraron una eficiencia mayor y significativa ( $p < 0.05$ ) ( $21.66 \pm 0.77\%$  y  $21.66 \pm 0.42\%$ , respectivamente) en comparación con la posición más alejada del área de transducción (50 mm), donde el porcentaje de eficiencia obtenido fue  $10.55 \pm 0.88\%$  (posición 1) y  $8.71 \pm 0.77\%$  (posición 3).

Tabla 5.1. Intensidad ultrasónica ( $IU$ ) y eficiencia calorimétrica ( $\eta$  en %) para diferentes posiciones y profundidades sobre la superficie del transductor durante el enfriamiento asistido con ultrasonido de una esfera de cobre estacionaria.

Posición	Distancia (mm)	$IU(W/m^2)$	$\eta$ (%)
1	25	2755.4±97.4 <sup>cB</sup>	21.66±0.77 <sup>cB</sup>
	40	2278.2±133.3 <sup>bAB</sup>	17.91±1.05 <sup>bAB</sup>
	55	1341.7±112.5 <sup>aB</sup>	10.55±0.88 <sup>aB</sup>
2	25	2359.2±245.1 <sup>bA</sup>	18.55±1.93 <sup>bA</sup>
	40	1864.0±324.2 <sup>bA</sup>	14.65±2.55 <sup>bA</sup>
	55	1062.6±112.5 <sup>aA</sup>	8.35±0.88 <sup>aA</sup>
3	25	2755.4±54.0 <sup>cB</sup>	21.66±0.42 <sup>cB</sup>
	40	2440.3±82.5 <sup>bB</sup>	19.19±0.65 <sup>bB</sup>
	55	1107.6±97.4 <sup>aAB</sup>	8.71±0.77 <sup>aAB</sup>

Valores promedio  $\pm$  desviación estándar ( $n = 3$ ). Diferentes letras minúsculas en la misma columna indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) según la prueba de Tukey entre profundidades por encima del área de transducción para una sola posición. Diferentes letras mayúsculas en la misma columna indican diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre diferentes posiciones dentro del baño de ultrasonido.

Sin embargo, no hay diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en la  $IU$  y la  $\eta$  (en %) entre alturas de 25 y 40 mm para la posición 2. En este caso, se podría inferir que estas posiciones están en el centro del baño y el efecto individual de los transductores se solapan, lo que da como resultado un aumento de la actividad cavitacional, pero una disminución de su intensidad. Esto podría resultar en tres tipos de fenómenos: el blindaje de las burbujas, el efecto de desacoplamiento y la coalescencia de las burbujas (Al-Juboori *et al.*, 2015). El primero es cuando una densa nube de burbujas de cavitación se forman debajo de los transductores, absorbiendo y dispersando las ondas. En el segundo, hay una reducción de la impedancia acústica del medio por la presencia de gran cantidad de burbujas en el medio irradiado; obstaculizando la conversión de la potencia ultrasónica en efectos mecánicos (Gogate, 2010). Finalmente, al existir una gran cantidad de burbujas, estas podrían fusionarse o coalescer, formando burbujas más grandes que implosionan con menos fuerza. Estos fenómenos en conjunto podrían estar influyendo en la obtención de una actividad de cavitación uniforme, lo que puede producir una mejor distribución del campo de presión y por tanto, efectos físicos netos en el sistema (Csoka *et al.*, 2011), pero al mismo tiempo, se podría estar produciendo una disminución de la  $IU$  y por tanto, una reducción de su eficiencia. Gogate (2010) mencionó que, si aumenta la intensidad disipada en el sistema, también aumenta el número de eventos de cavitación, aumentando así la actividad de cavitación general y por lo tanto, se pueden observar efectos mejorados. Pero también mencionó que la presencia de burbujas de cavitación puede dispersar las ondas sonoras incidentes y, por lo tanto, la concentración de burbujas tendría una influencia significativa en el campo de presión.

### 5.1.2. Enfriamiento asistido con ultrasonido de alta intensidad

El efecto de la distribución del campo acústico sobre el enfriamiento de una esfera de cobre estacionaria sumergida en un baño ultrasónico refrigerado (0°C) fue evaluado en las mismas posiciones y alturas en las que se evaluó previamente la *IU*. De esta manera, la Figura 5.2 muestra las curvas de enfriamiento de la esfera de cobre irradiada con ultrasonido obtenidas a las diferentes posiciones y alturas. Las curvas se expresan como el logaritmo natural de las relaciones de temperatura ( $LnRT$ ) como un número adimensional de acuerdo a la Ecuación 5.1.

$$LnRT = Ln \left( \frac{T - T_m}{T_0 - T_m} \right) \quad (5.1)$$

donde  $T$  es la temperatura (°C),  $T_m$  es la temperatura del medio de inmersión (°C) y  $T_0$  es la temperatura inicial (°C) de la esfera de cobre. Dado que la temperatura del medio de inmersión y la temperatura inicial de la esfera era 0°C y 20°C, respectivamente. Los valores de  $LnRT$  de -1 y -3 corresponden a las temperaturas de 7°C y 1°C, respectivamente. Por lo tanto, es importante considerar el comportamiento logarítmico de las curvas al comparar gráficamente los resultados presentados como  $LnRT$ . Cada curva de enfriamiento representada en la Figura 5.2 corresponde a un promedio de tres repeticiones.

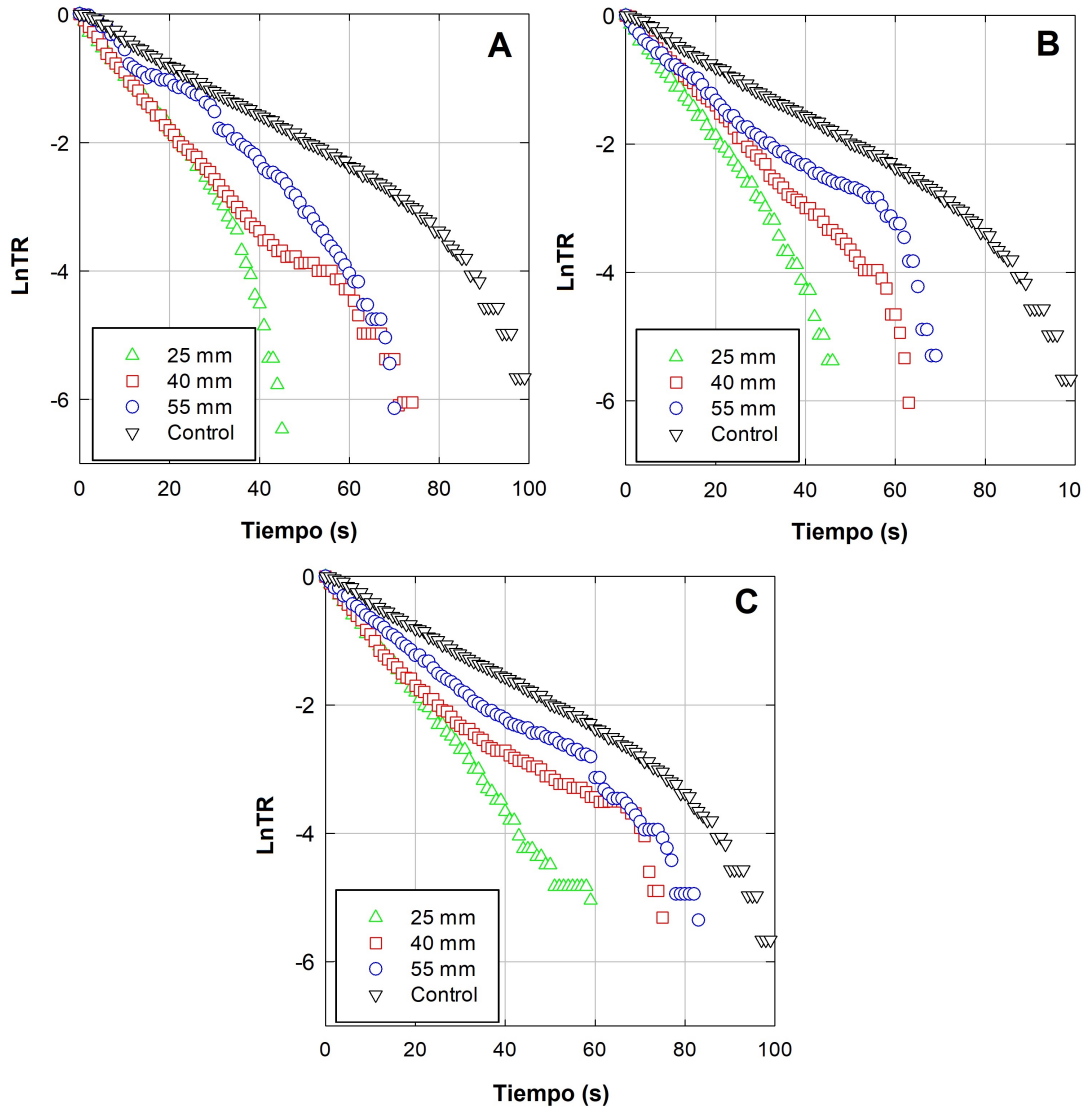


Figura 5.2. Efecto de diferentes profundidades sobre la relación de temperatura durante el enfriamiento asistido con ultrasonido de una esfera de cobre estacionaria sumergida en una solución refrigerada ( $0^{\circ}\text{C}$ ), para la posición 1 (A), 2 (B) y 3 (C).

Para los experimentos realizados sin irradiación ultrasónica, solo se evaluó la posición en el centro del baño, es decir, la posición 2 a una altura de 25 mm, ya que el flujo es el mismo en toda el área de la sección transversal. Como se puede observar, se requirieron 100 s de tiempo para enfriar la esfera de cobre sin irradiación ultrasónica, mientras que la irradiación ultrasónica en cualquier posición del baño disminuyó significativamente ( $p < 0.05$ ) el tiempo de enfriamiento, y los tiempos de enfriamiento más bajos se obtuvieron cuando la esfera estuvo a una altura de 25 mm para todas las posiciones, obteniendo valores por debajo de los 59 segundos. Las profundidades de 40 y 55 mm alcanzaron tiempos de enfriamiento de 64 a 84 segundos, por lo tanto, la cantidad de calor

transferido de la esfera al medio de enfriamiento fue mayor que la cantidad de calor generado por la acción de los ultrasonidos en la superficie de la esfera. Cuando se analizan los resultados del tiempo de enfriamiento con los resultados de la intensidad ultrasónica, se puede observar que la aplicación del ultrasonido tuvo un efecto considerable en la mejora de la velocidad de transferencia de calor, ya que se redujo más del doble el tiempo de enfriamiento en comparación a la esfera sometida a enfriamiento en ausencia de irradiación ultrasónica, por lo tanto, cuanto mayor sea la  $IU$ , menor es el tiempo de enfriamiento de la esfera.

### 5.1.3. Determinación del coeficiente de transferencia de calor por convección

A partir de las curvas de enfriamiento obtenidas experimentalmente para cada posición y altura de la esfera, se calcularon los valores correspondientes del coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ,  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) mediante la solución analítica de la ecuación de transferencia de calor unidimensional en coordenadas esféricas (Ecuación 5.2), para una esfera sólida sumergida en un fluido circundante.

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5.2)$$

donde  $r$  es la distancia desde el centro de la esfera a lo largo del radio,  $\alpha$  es la difusividad térmica,  $T$  es la temperatura y  $t$  es el tiempo.

La solución de la ecuación de transferencia de calor requiere determinar las condiciones iniciales (Ecuación 5.3) y de frontera (Ecuaciones 5.4 y 5.5 ) las cuales se describen a continuación:

$$T(r, 0) = T_i \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial r} = 0 \quad (5.4)$$

$$-k \frac{\partial T(R, t)}{\partial r} = h [T(R, t) - T_m] \quad (5.5)$$

En base a las condiciones iniciales y de frontera descritas anteriormente, hay un límite convectivo en la superficie de la esfera que es proporcional al  $h$  y las diferencias entre la temperatura superficial y la temperatura del medio de inmersión. Al resolver la ecuación 5.2, considerando analíticamente el límite y las condiciones iniciales y de frontera, se obtuvo la Ecuación 5.6 para la esfera.

$$\frac{T(r, t) - T_m}{T_i - T_m} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4(\text{sen} \lambda_n - \lambda_n \cos \lambda_n)}{2\lambda_n - \text{sen}(2\lambda_n)} \frac{\text{sen}(\lambda_n \frac{r}{R})}{\lambda_n \frac{r}{R}} e^{-\lambda_n^2 \tau} \quad (5.6)$$

$$1 - \lambda_n \cot \lambda_n = Bi_r \quad (5.7)$$

La relación de temperaturas ( $T(r,t) - T_m / T_i - T_m$ ) contra el tiempo ( $t$ ) de acuerdo a la Ecuación 5.6 se utilizó para calcular el coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ). Los cuales fueron estimados por regresión no lineal simultánea a tres experimentales independientes. Para estudiar el gradiente de temperatura dentro de un objeto cuando la convección y la conducción existen simultáneamente, se introduce el número  $Bi$  (Ecuación 1.10). Si el número de  $Bi$  es  $<0.1$ , la variación de la temperatura a través con la ubicación dentro del cuerpo es ligera y, de manera razonable, se puede considerar como si fuera uniforme (Cengel, 2006). Para la esfera de cobre utilizada en el presente trabajo, los valores del número de  $Bi$  alcanzados fueron menores a 0.1.

Por lo tanto, considerando todo lo anterior, en la Tabla 5.2 se muestran los valores del  $h$  estimado a partir de la solución analítica (Ecuación 5.6), observándose que se obtuvieron altos coeficientes de correlación ( $R^2 > 0.96$ ) que reflejan un adecuado ajuste entre los valores experimentales y los calculados.

Tabla 5.2. Coeficientes de transferencia de calor ( $h$ ) obtenidos a partir de una solución analítica para diferentes posiciones y profundidades durante el enfriamiento asistido con ultrasonido de una esfera de cobre estacionaria.

Posición	Distancia (mm)	$h$ (W/m <sup>2</sup> °C)	R <sup>2</sup>
1	25	1071.5 (1046.8/1096.2)	0.98
	40	1048.9 (1031.9/1065.8)	0.99
	55	626.0 (603.7/648.3)	0.96
2	25	1137.0 (1095.4/1178.7)	0.97
	40	838.3 (822.8/853.7)	0.99
	55	712.6 (689.9/735.3)	0.96
3	25	1050.4 (1035.1/1065.6)	0.99
	40	949.5 (919.0/980.0)	0.97
	55	679.3 (660.3/698.3)	0.97

Los valores en paréntesis indican el intervalo de confianza al 95%. Estimados por regresión no lineal simultánea a 3 experimentales independientes.

Los datos mostraron que las curvas de enfriamiento sin irradiación ultrasónica obtuvieron un coeficiente de valor de  $450. \pm 5.1$  W/m<sup>2</sup>°C ( $R^2 > 0.99$ ), mientras que todos los coeficientes de transferencia de calor en las muestras irradiadas con ultrasonidos fueron significativamente superiores ( $p < 0,05$ ). Para poder tener un mejor entendimiento de la mejora del coeficiente por efecto de la irradiación ultrasónica, a partir de estos resultados, se evaluó la relación de mejora de la transferencia de calor ( $Er$ ; %) (Ecuación 5.8), inducido por el ultrasonido, el cual se define como:

$$Er = \frac{h_{US} - h_0}{h_0} \times 100 \tag{5.8}$$

donde  $h_{US}$  es el coeficiente de transferencia de calor bajo el efecto del ultrasonido, y  $h_0$  es el coeficiente de la transferencia de calor bajo las mismas condiciones, pero sin ultrasonido (Chen

*et al.*, 2018b). Asimismo, se determinó el incremento de transferencia de calor el cuál esta dado por la diferencia entre los coeficientes de transferencia de calor (Liu *et al.*, 2018):

$$HTI = h_{US} - h_0 \quad (5.9)$$

y finalmente, se definió el factor de mejora ( $Ef$ ) el cuál se encuentra dado por la relación de éstos coeficientes, anteriormente mencionados.

$$Ef = \frac{h_{US}}{h_0} \quad (5.10)$$

Por lo que los resultados mostraron que las relaciones de mejora de la transferencia de calor (Figura 5.3A) fueron en un rango de 39.1 a 152.6%, con respecto a los experimentos no irradiados (Figura 5.3B), esto corresponde a un factor de mejora promedio de 2.0, es decir, dos veces más. Por otro lado, los resultados mostraron que, para cada posición, los valores de  $h$  disminuyen cuando aumenta la distancia por encima del área de transducción, además, cuando se comparan las posiciones, los valores más altos de los coeficientes de transferencia de calor pertenecían a la posición 2.

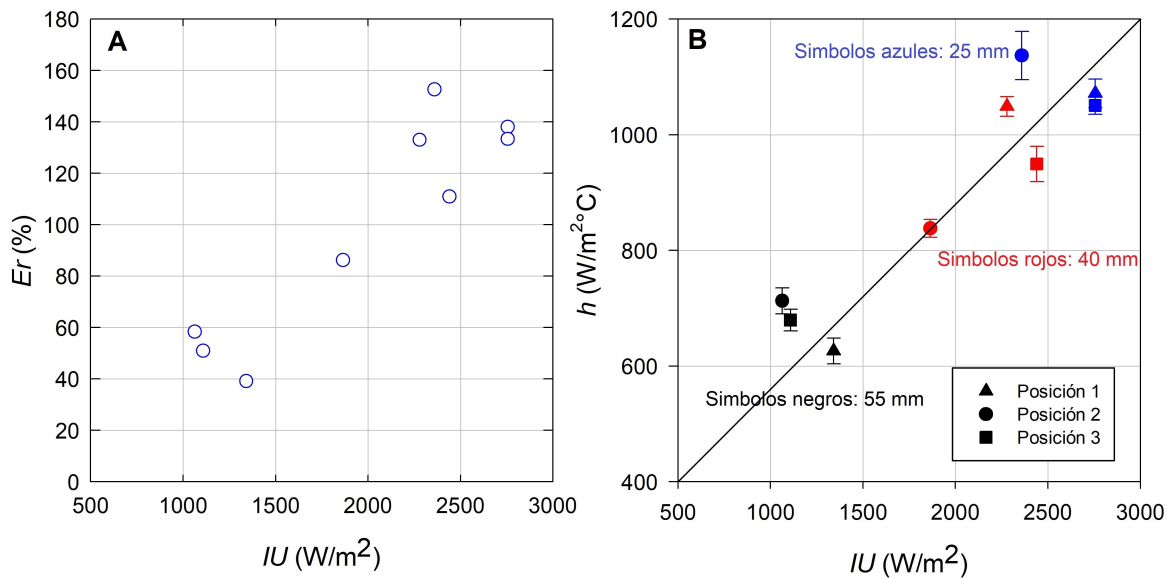


Figura 5.3. Influencia de la intensidad ultrasónica ( $IU$ ;  $W/m^2$ ) sobre la relación de mejora de la transferencia de calor ( $Er$ , %) (A) y el coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ;  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) (B) para diferentes posiciones y profundidades por encima del área de transducción durante el enfriamiento asistido con ultrasonido de una esfera de cobre estacionaria.

Una vez determinados los coeficientes, y con el objetivo de poder comprender mejor el comportamiento de los valores de  $h$ , estos resultados se relacionaron con los obtenidos para la  $IU$  (Figura

5.3). Por un lado, la correlación entre  $h$  e  $IU$  mostró que existe una influencia significativa ( $r=0.92$ ) entre ellos (Figura 5.3B). Se puede observar en la 5.3B que cuanto mayor es la  $IU$ , mayores son los valores de  $h$ , y también existió un efecto de la altura, donde los valores más altos se obtuvieron a 25 mm de altura por encima de la superficie del transductor. Por lo tanto, los resultados mostraron que los coeficientes de transferencia de calor más altos ( $R^2 \geq 0.97$ ) pertenecieron a 25 mm de altura para todas las posiciones, siendo el mayor valor de 1137.0 (1095.4/1178.7)  $W/m^2\text{°C}$  para la posición 2 ( $Er=152.6\%$ ) con un incremento de transferencia de calor de 686.9  $W/m^2\text{°C}$ .

Como se mencionó anteriormente, a pesar de no tener una mayor intensidad ultrasónica en la posición 2, existe una mejor distribución del campo acústico debido a que existe una actividad de cavitación uniforme (Csoka *et al.*, 2011) y se produce un mejor efecto físico que aumenta la transferencia de calor (el doble), reduciendo los tiempos de enfriamiento, de modo que se intensifica el fenómeno de transferencia. En el caso de la altura a 40 mm, aunque mostró valores cercanos a los 25 mm en la intensidad ultrasónica, no obtuvo un coeficiente de transferencia de calor alto o similar, por lo que no ocurrió el mismo comportamiento entre ellos. Esta diferencia se puede atribuir a la influencia de la forma en que se transmite la onda ultrasónica. En este sentido, algunos trabajos de investigación previamente reportados en la bibliografía, mostraron que el efecto del ultrasonido tiene una influencia importante por la longitud de onda de la fuente sonora conductora (Capote & de Castro, 2007; Gogate, 2010; Kulkarni & Rathod, 2014; Rao & Rathod, 2015) y por la amplitud de la onda, es decir, por el fenómeno de atenuación (Feng *et al.*, 2011; McClements & Gunasekaran, 1997). Por un lado, en una onda, la longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre picos de amplitud sucesivos y se relaciona con la frecuencia a través de la velocidad de la onda que viaja. Esta velocidad medible actúa sobre las partículas del medio debido al recorrido de la onda a través de dicho medio, de modo que, la onda hace oscilar las partículas del medio y en cualquier momento, las partículas se acercan o alejan unas de otras provocando aumentos y disminuciones alternas en la densidad media y presión. Por lo tanto, la energía impartida al medio por el ultrasonido es mecánica como consecuencia de la oscilación de las partículas del medio (Hecht, 1996). Por otro lado, en un instante específico de tiempo durante la propagación de la onda, la distancia afecta a las partículas que se alejan sucesivamente de la fuente de generación de la onda sonora, por lo que, las partículas más cercanas pueden sentir fuertemente la amplitud de la onda sonora, mientras que las partículas que están más lejanas experimentan la onda de sonido con menos fuerza. Por tanto, en un instante de tiempo fijo, la disminución de la amplitud de la onda con respecto a la distancia o altura con respecto a la fuente generadora de la onda (transductor) se debe a la atenuación del medio (Feng *et al.*, 2011), es decir, a la absorción de la energía de onda en el medio de propagación.

Como se mencionó anteriormente, a pesar de no tener una mayor intensidad ultrasónica en la posición 2, existe una mejor distribución del campo acústico debido a que existe una actividad de cavitación uniforme (Csoka *et al.*, 2011) y se produce un mejor efecto físico que aumenta la

transferencia de calor (el doble), reduciendo los tiempos de enfriamiento, de modo que se intensifica el fenómeno de transferencia. En el caso de la altura a 40 mm, aunque mostró valores cercanos a los 25 mm en la intensidad ultrasónica, no obtuvo un coeficiente de transferencia de calor alto o similar, por lo que no ocurrió el mismo comportamiento entre ellos. Esta diferencia se puede atribuir a la influencia de la forma en que se transmite la onda ultrasónica. En este sentido, algunos trabajos de investigación previamente reportados en la bibliografía, mostraron que el efecto del ultrasonido tiene una influencia importante por la longitud de onda de la fuente sonora conductora (Capote y De Castro, 2007; Gogate 2010; Kulkarni y Rathod, 2014; Rao y Rathod, 2015) y por la amplitud de la onda, es decir, por el fenómeno de atenuación (Feng et al., 2011; McClements, 1995). Por un lado, en una onda, la longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre picos de amplitud sucesivos y se relaciona con la frecuencia a través de la velocidad de la onda que viaja. Esta velocidad medible actúa sobre las partículas del medio debido al recorrido de la onda a través de dicho medio, de modo que, la onda hace oscilar las partículas del medio y en cualquier momento, las partículas se acercan o alejan unas de otras provocando aumentos y disminuciones alternas en la densidad media y presión. Por lo tanto, la energía impartida al medio por el ultrasonido es mecánica como consecuencia de la oscilación de las partículas del medio (Hecht, 1996). Por otro lado, en un instante específico de tiempo durante la propagación de la onda, la distancia afecta a las partículas que se alejan sucesivamente de la fuente de generación de la onda sonora, por lo que, las partículas más cercanas pueden sentir fuertemente la amplitud de la onda sonora, mientras que las partículas que están más lejanas experimentan la onda de sonido con menos fuerza. Por tanto, en un instante de tiempo fijo, la disminución de la amplitud de la onda con respecto a la distancia o altura con respecto a la fuente generadora de la onda (transductor) se debe a la atenuación del medio (Feng et al., 2011), es decir, a la absorción de la energía de onda en el medio de propagación.

Con base en las consideraciones anteriores, se ha informado que la longitud de onda de la onda acústica ha influido en los fenómenos de transferencia tanto de masa como de calor. Así, Rao & Rathod (2015) estudiaron el efecto de la onda ultrasónica sobre el fenómeno de transferencia de masa durante la extracción de *andrografólido* de *Andrographis paniculata* mediante ultrasonido. Estos autores mencionaron que existe un valor máximo de la onda en la que es muy potente y esto ocurre a la mitad de la longitud de onda en la dirección axial (aproximadamente  $\lambda/2 = 3.4$  cm) considerando una velocidad del sonido en el agua (1500 m/s) y la frecuencia a la que funciona el baño ultrasónico (22 kHz). Por lo tanto, los resultados experimentales de estos autores mostraron que el rendimiento máximo de extracción se alcanzó a una distancia/altura de 2.54 cm (que es cercana a 3.4 cm) sobre el área de transducción durante su estudio de mapeo dentro de un baño ultrasónico. Del mismo modo, Kulkarni & Rathod (2014) encontraron el rendimiento de extracción óptimo de *mangiferina* de hojas de *indica* a 2.4 cm de profundidad. Los autores mencionaron que si se considera que la velocidad en el agua (1500 m/s) es el producto de la frecuencia, considerando en su

equipo ultrasónico una energía de 25 kHz, la longitud de onda es igual a 6 cm y que la máxima intensidad ultrasónica puede ser  $\lambda/2$  que es de alrededor de 3 cm (valor cercano a su posición experimental). Capote & de Castro (2007) mencionaron que el efecto de la longitud de onda, desde el punto de vista del nivel del medio de propagación (agua), dentro del baño ultrasónico afecta la intensidad con la que viaja la onda. Si el nivel es significativamente menor que la mitad de la longitud de onda del ultrasonido en el agua ( $\lambda=2.3$  cm), entonces la intensidad del ultrasonido disminuye al aumentar la distancia desde la fuente de sonido, pero cuando el nivel es aproximadamente un múltiplo de  $\lambda/2$ , se presentarán perfiles de ondas estacionarias resonantes, resultando en intensidades de ultrasonido locales extremas.

En el caso del estudio de la influencia de los parámetros de las ondas acústicas en la transferencia de calor, autores como Chen *et al.* (2018b) y Liu *et al.* (2018) mencionaron que es posible que la distribución de la presión acústica y la intensidad de la cavitación no simplemente disminuyan con el aumento de la altura con respecto a los transductores, y que la densidad de las burbujas de cavitación no se distribuya uniformemente en el baño ultrasónico, por lo que es posible que para ciertas posiciones las burbujas de cavitación puedan estallar fácilmente, mientras que en otras posiciones se podrían estar formando con mayor frecuencia, lo que probablemente podría estar afectando la mejora de la transferencia de calor.

De esta forma, Chen *et al.* (2018b) evaluaron la transferencia de calor bajo vibraciones ultrasónicas considerando parámetros experimentales como la altura sobre el área de transducción, el flujo de calor y el subenfriamiento del líquido. Así, obtuvieron como resultado experimental una longitud de onda de 38 mm y evaluaron 9, 19 y 22 mm de altura y los compararon con los obtenidos por Liu *et al.* (2018) a una altura de 15, 22 y 33 mm. Llamaron región del "nodo" a la intersección de la onda con su eje central, y pudieron ver que para los valores de altura que coinciden con esa región del nodo, la mejora de la transferencia de calor fue relativamente menor debido al hecho de que había relativamente menores fluctuaciones de presión. Sin embargo, si la altura de prueba experimental permanece en la región "anti-nodo", es decir, la parte más ondulada de la onda, se obtendrían mayores fluctuaciones de presión, lo que mejoraba la transferencia de calor.

En este sentido, en el presente trabajo se calculó la longitud de onda a partir de la frecuencia del equipo experimental (37 kHz) y una velocidad de sonido del agua de 1500 m/s, considerando que el medio de propagación era acuoso en su mayor proporción, para lo cual se obtuvo un resultado de  $\lambda=4.05$  cm, siendo entonces, la mitad de la longitud de onda de  $\lambda/2=20.3$  mm. Los resultados mostraron (Figura 5.4) que la altura de 25 mm era la que tenía el valor más alto del coeficiente, ya que su valor estaba cerca de la mitad de la longitud de onda (valor cercano a 20.3 mm), por lo que a esta distancia la forma de la onda estaba en su parte más ondulada, es decir, en la región "anti-nodo", por lo que a pesar de no obtener la mayor intensidad ultrasónica, sí obtuvo una mejor distribución de la presión acústica debido a la expansión de la onda, lo que intensificó la transfe-

cia de calor. Para el caso de la distancia de 40 mm, ésta se presentó en la intersección denominada "nodo", por lo que en este caso la onda presentaba fluctuaciones de presión bajas, disminuyendo la transferencia de energía, a pesar de obtener valores altos de intensidad ultrasónica. Además, se puede notar que la altura experimental por encima del área de transducción en 5.5 cm obtuvo los valores más bajos del coeficiente de transferencia de calor y de  $IU$ , ya que en esta posición, a pesar de estar ubicada en una zona "anti-nodo", fue posible observar que hubo una mayor influencia de la amplitud de onda, ya que, para esa distancia, este parámetro disminuye, perdiendo fuerza la onda en ese instante de tiempo, debido a que hubo una atenuación del medio de propagación. Por tanto, por un instante de tiempo de propagación de la onda, la longitud de onda no cambia y permanece constante, pero la amplitud de onda sí es cambiante, disminuyendo con respecto a la superficie del área acústica debido a la atenuación de la onda en el medio de propagación.

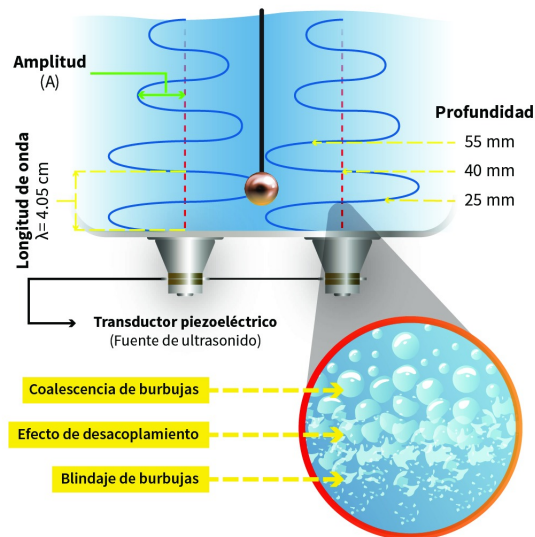


Figura 5.4. Importancia de la longitud y amplitud de la onda ultrasónica con respecto a las profundidades por encima del área de transducción, en un instante de tiempo fijo y fenómenos de actividad de cavitación (blindaje de burbujas, efecto de desacoplamiento y coalescencia de burbujas).

Por tanto, en base a los resultados obtenidos, la mejor opción para colocar la esfera dentro del baño ultrasónico fue en la posición 2 a una altura de 25 mm, ya que se obtuvo una mejora del coeficiente de transferencia debido a que, en esta ubicación, existe una mejor distribución del campo acústico (transmisión acústica) como resultado de una actividad de cavitación más uniforme (dispersión) y por lo tanto, una mejor presión acústica, así como el efecto de la superposición de las áreas más onduladas de la onda y la fuerza de su amplitud. Una actividad de cavitación uniforme produce efectos generales mucho mejores en comparación con una cavitación más intensa, es decir, con una alta intensidad ultrasónica concentrada cerca de la superficie del transductor.

### 5.1.4. Validación del coeficiente de transferencia de calor por convección

El uso de la solución analítica utilizada en el presente trabajo se validó en un proceso de enfriamiento asistido por ultrasonido en muestras de diferente naturaleza y dimensiones, con el fin de evaluar su capacidad y precisión. Para ello, se realizaron procedimientos de enfriamiento asistido por ultrasonido en un cilindro de cobre y un cilindro de papa (0.02 m de diámetro x 0.03 m de longitud). Las condiciones experimentales utilizadas para obtener las curvas de enfriamiento de los cilindros fueron las mismas que las utilizadas anteriormente para obtener las curvas de enfriamiento de la esfera de cobre (Apartado 4.1.3) ( $h=1137.0 \text{ W/m}^2\text{°C}$  (1095.4/1178.7)); posición 2, altura de 25 mm) utilizando la Ecuación 5.6. El grado de ajuste de los datos experimentales con la solución analítica se comparó utilizando propiedades térmicas conocidas del cobre ( $k=406 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ,  $C_p=385 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho=8941 \text{ kg/m}^3$ ) y la papa ( $k=0.555 \text{ W/m}^2\text{°C}$ ;  $\rho=1071.2 \text{ kg/m}^3$ ;  $C_p=4051.0 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$ ), mediante la Ecuación 5.11.

$$\theta = \frac{T - T_m}{T_i - T_m} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\lambda_n} \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)} J_0\left(\lambda_n \frac{r}{R}\right) e^{-\lambda_n^2 \tau_r} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4 \text{sen} \lambda_m}{2\lambda_m + \text{sen}(2\lambda_m)} \cos\left(\lambda_m \frac{x}{L}\right) e^{-\lambda_m^2 \tau_x} \quad (5.11)$$

$$\lambda_n \frac{J_1 \lambda_n}{J_0 \lambda_n} = Bi_r \quad (5.12)$$

$$\lambda_m \tan \lambda_m = Bi_x \quad (5.13)$$

Se simularon las curvas de enfriamiento de las muestras cilíndricas de cobre y papa y se compararon con los datos obtenidos experimentalmente. De esta forma, la Figura 5.5A muestra los resultados de la evolución de la temperatura con respecto al tiempo de enfriamiento en la muestra del cilindro de cobre, observando la concordancia de los datos experimentales con los ajustados por el modelo. Para este caso, se presentó un ajuste adecuado con los datos experimentales (Figura 5.5B), por lo que se encontró una estrecha concordancia entre los resultados de la simulación, siendo su capacidad de ajuste de  $R^2=0.98$ . Por otro lado, la Figura 5.6A muestra el ajuste del modelo con los datos experimentales en la muestra del cilindro de papa, observándose un comportamiento típico del proceso de transferencia de calor controlado por conducción, que manifestó un breve período de retardo, seguido de una disminución exponencial de la temperatura. La bondad de ajuste para estos resultados fue  $R^2=0.99$ .

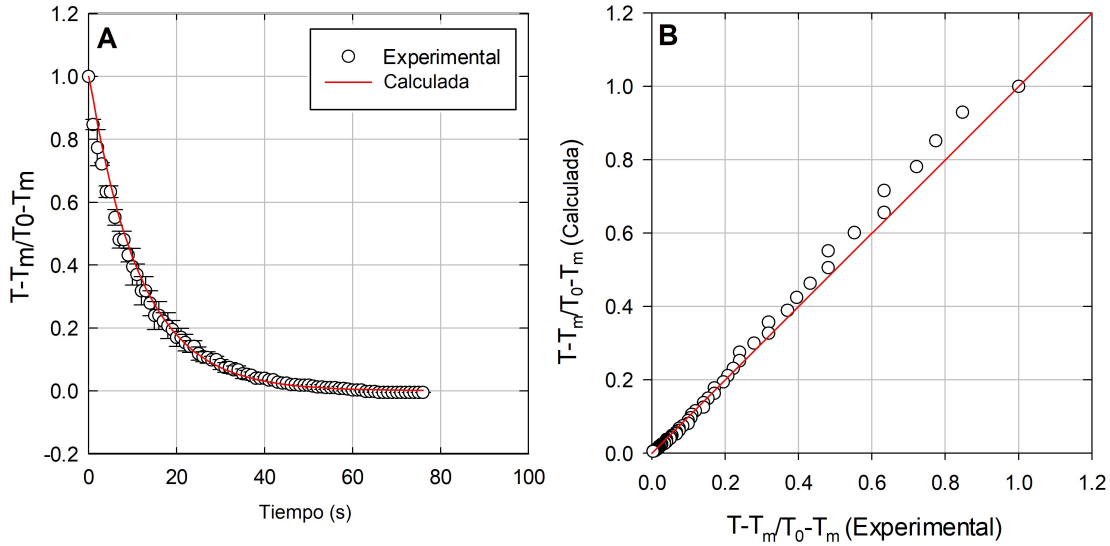


Figura 5.5. Comparación de las curvas de enfriamiento experimental y simulada para un cilindro de cobre estacionario sumergido en un baño refrigerado a  $0^{\circ}\text{C}$  (A) y el ajuste de los datos experimentales con el modelo (B). Valores promedio  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ ).

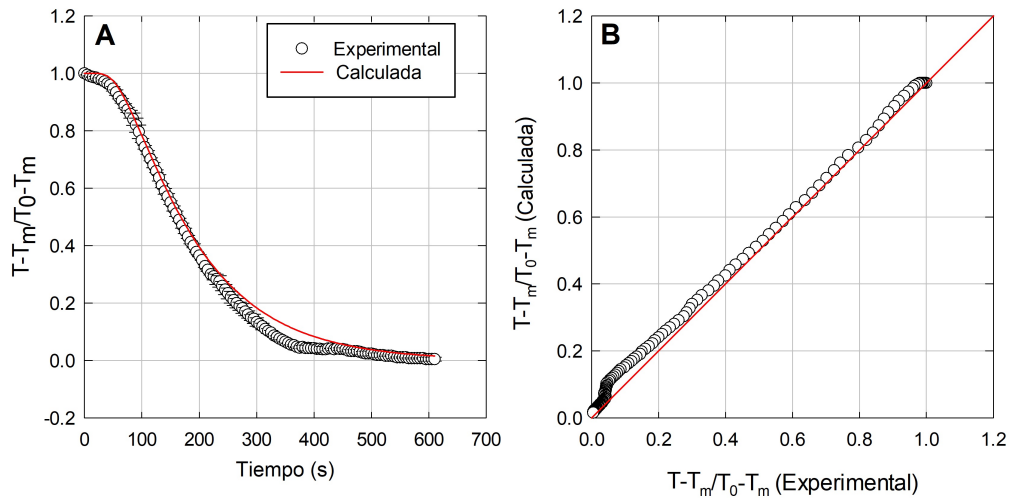


Figura 5.6. Comparación de las curvas de enfriamiento experimental y simulada para un cilindro de papa estacionario sumergido en un baño refrigerado a  $0^{\circ}\text{C}$  (A) y el ajuste de los datos experimentales con el modelo (B). Valores promedio  $\pm$  desviación estándar ( $n=3$ ).

Como se observó, los resultados de la solución analítica ajustaron adecuadamente con los datos experimentales en ambas curvas de enfriamiento, y estos resultados validaron los valores de transferencia de calor.

Los resultados obtenidos en el presente capítulo mostraron que la distribución del campo acústico al no ser uniforme dentro del baño ultrasónico afectaba significativamente los valores de  $h$

obtenidos, manifestando que existe una correlación significativa entre la  $IU$  y el  $h$ . Este hecho resulta de interés para obtener resultados reproducibles, por lo tanto, este aspecto cobraría importancia cuando el efecto esperado tiene una fuerte dependencia de los aspectos químicos y físicos relacionados con la cavitación acústica, por lo que se podrían obtener resultados desfavorables si se coloca la muestra en posiciones con diferente actividad de cavitación, reduciendo la eficiencia del ultrasonido.

## 5.2. Análisis del proceso de calentamiento/enfriamiento por convección asistido por ultrasonido: desarrollo y aplicación de una ecuación de Nusselt

Las operaciones de procesamiento de alimentos con frecuencia involucran etapas de calentamiento o enfriamiento entre fluidos y materiales sólidos, donde la conducción y la convección representan los mecanismos dominantes de transferencia de calor. El ultrasonido es una tecnología de procesamiento de alimentos no térmica prometedora que ha sido reconocida como una herramienta eficaz para intensificar la transferencia de calor en diferentes procesos como secado al aire, enfriamiento, congelación y escaldado, aumentando la eficiencia de los procesos y mejorando la calidad final del producto (Alvarez *et al.*, 2019; Contreras *et al.*, 2018; Kiani & Sun, 2016; Roohi *et al.*, 2019; Tian *et al.*, 2020; Zhu *et al.*, 2020).

Las correlaciones empíricas obtenidas mediante el ajuste de datos experimentales se utilizan ampliamente para calcular los coeficientes de transferencia de calor en varias aplicaciones (Kwon *et al.*, 2020; Lei *et al.*, 2019; Schatte *et al.*, 2016; Taler, 2016; Wen *et al.*, 2018). Estos modelos se seleccionan en función de las características del proceso, incluido el régimen de flujo, la disposición geométrica y el rango de números adimensionales (Reynolds, Prandtl, Grashof, etc.) en el que se desarrollaron. Para los procesos de convección natural y forzada, se ha demostrado que la irradiación del ultrasonido mejora los coeficientes de transferencia de calor (Bulliard-Sauret *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2016; Poncet *et al.*, 2021; Wan *et al.*, 2020); sin embargo, solo se han desarrollado unas pocas correlaciones que incorporan su efecto (Cai *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2018b; Kiani *et al.*, 2013a). Estas relaciones pueden ser útiles para analizar el efecto de la irradiación del ultrasonido para el diseño y la optimización de procesos o para el desarrollo de nuevas aplicaciones. Por lo tanto, el desarrollo de éste tipo de aplicaciones o relaciones matemáticas que contemplen la irradiación por ultrasonido en procesos de transferencia de calor por convección está profundamente ligado a la comprensión de las relaciones funcionales entre las variables del proceso y la creación de protocolos experimentales para logra estas tareas.

Considerando todo lo anterior, en el siguiente apartado de resultados se tuvo como objetivo el analizar un proceso de calentamiento/enfriamiento por convección asistido con irradiación ultrasónica y para ello, primero se desarrolló un modelo de transferencia de calor por convección como un proceso de entrada-respuesta, posteriormente, se desarrolló y validó una nueva correlación de la transferencia de calor por convección y finalmente, se aplicó la correlación propuesta mediante el análisis de la cinética de calentamiento acelerado con irradiación ultrasónica en muestras de jamón curado. A continuación se muestran los resultados obtenidos para dichos objetivos, los cuales ya han sido publicados (Martínez-Ramos *et al.*, 2021).

## 5.2.1. Teoría

### 5.2.1.1. Modelo de transferencia de calor

Las Ecuaciones 5.14 y 5.15 describen el intercambio de energía entre un sólido de forma arbitraria y un fluido circundante contenido en un recipiente con flujo continuo, mezclado idealmente y con una fuente de energía ultrasónica (Figura 5.7).

$$\frac{d(\rho_{\infty}Cp_{\infty}\varepsilon V\Theta_1)}{dt} = \rho_{\infty}Cp_{\infty}F\Theta_0 - \rho_{\infty}Cp_{\infty}F\Theta_1 + fP + US(\theta - \Theta_1) \quad (5.14)$$

$$\frac{d(\rho_s C_{ps} (1 - \varepsilon) V \mathbf{T})}{dt} = hA (\Theta_1 - \Theta_{1i}) + (1 - f)P \quad (5.15)$$

Las Ecuaciones 5.16 y 5.17 representan la continuidad de la transferencia de calor en la interfaz sólido-fluido y la condición de equilibrio térmico en la interfaz sólido-fluido, respectivamente.

$$hA (\Theta_1 - \Theta_{1i}) = DA (T_i - \mathbf{T}) \quad (5.16)$$

$$T_i = \Theta_{1i} \quad (5.17)$$

Donde  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $A$ ,  $V$ ,  $\varepsilon$ ,  $f$ ,  $F$ ,  $h$ ,  $D$ ,  $U$ ,  $S$ ,  $\theta$ ,  $\Theta$  y  $\mathbf{T}$  son la densidad, calor específico, área del sólido, volumen (sólido más el fluido), fracción de volumen ocupada por el fluido, fracción de la potencia ultrasónica absorbida por el fluido, flujo, coeficiente de transferencia de calor por convección (transferencia de calor del fluido al sólido), coeficiente de transferencia de calor conductivo (transferencia de calor de la superficie al interior), coeficiente de transferencia de calor global (transferencia de calor entre el medio circundante y el recipiente), superficie del recipiente, temperatura circundante, temperatura del fluido y temperatura promedio del sólido, respectivamente; los subíndices  $\infty$ ,  $s$ ,  $i$ ,  $0$  y  $1$  indican el fluido, el sólido, la interfaz fluido-sólido, la corriente de entrada y la corriente de salida, respectivamente.

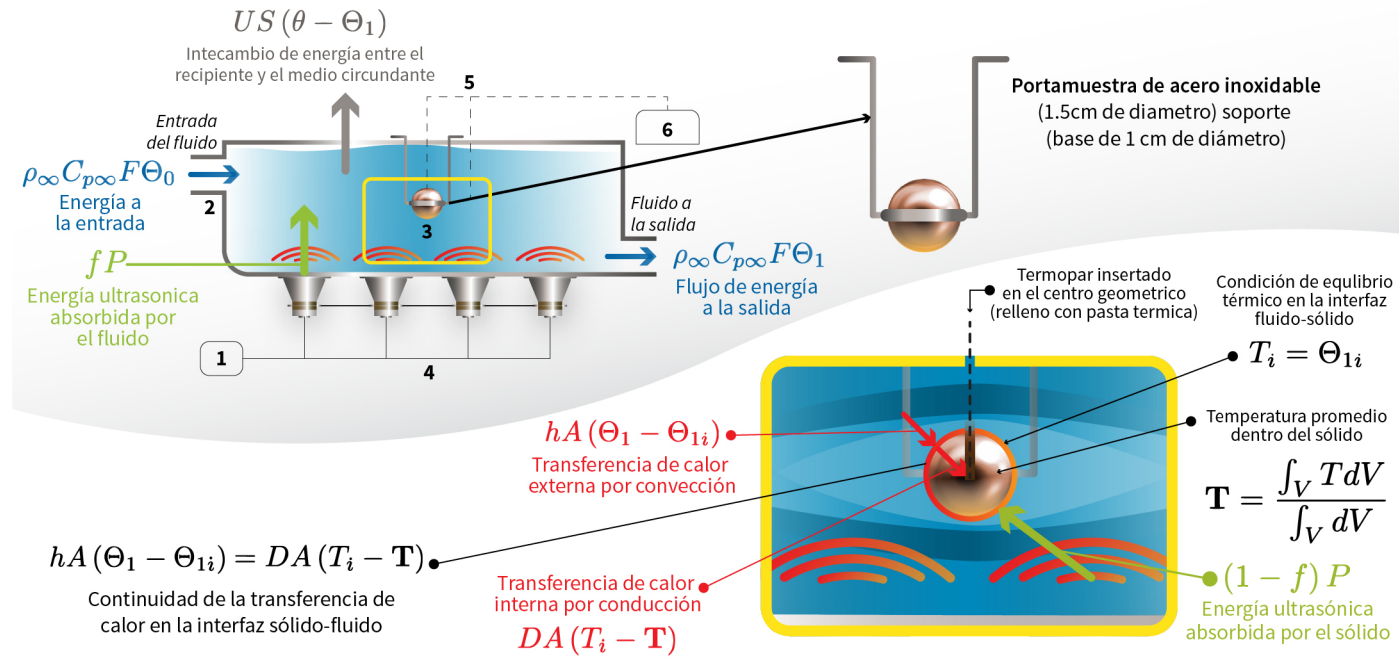


Figura 5.7. Montaje experimental para el estudio del proceso de enfriamiento/calentamiento convectivo asistido por ultrasonido. (1) Generador de ultrasonido, (2) Tanque de acero inoxidable, (3) Figura de cobre (esfera, cilindro y cubo), (4) Transductores, (5) Termopar tipo K, (6) Medidor de temperatura.

De acuerdo a la Ecuación 5.14 el flujo de energía acumulado por el fluido es igual a la suma del flujo de energía a la entrada ( $\rho_{\infty}C_{p\infty}F\Theta_0$ ), el flujo de energía a la salida ( $-\rho_{\infty}C_{p\infty}F\Theta_1$ ), la energía ultrasónica absorbida por el fluido ( $fP$ ) y el intercambio de energía entre el recipiente y el medio circundante ( $US(\theta - \Theta_1)$ ). Por otro lado, la Ecuación 5.15 es una ecuación de transferencia de calor para un volumen de control promedio, la cual expresa el flujo de energía acumulado por el sólido como la suma del flujo del intercambio de energía entre el fluido y la superficie sólida ( $hA(\Theta_1 - \Theta_{1i})$ ), y la energía ultrasónica absorbida por el sólido ( $(1-f)P$ ). La Ecuación 5.16 representa la continuidad de la transferencia de calor en la interfaz, es decir el flujo de energía transferido del fluido a la superficie sólida por convección ( $hA(\Theta_1 - \Theta_{1i})$ ), es igual al flujo de energía que sale de la interfaz fluido-sólido hacia el interior por conducción ( $DA(T_i - \mathbf{T})$ ). Finalmente la Ecuación 5.17 representa la condición de equilibrio térmico. Las Ecuaciones 5.15, 5.16 y 5.17 producen

$$\frac{d(\rho_s C_{ps} (1 - \varepsilon) V \mathbf{T})}{dt} = HA(\Theta_1 - \mathbf{T}) + (1 - f)P \quad (5.18)$$

con

$$\frac{1}{H} = \frac{1}{h} + \frac{1}{D} \quad (5.19)$$

donde  $H$  es un coeficiente global de transferencia de calor que agrupa los mecanismos de conducción y convección. El coeficiente de transferencia de calor interno  $D$  se encuentra en función de la conductividad térmica y el espesor efectivo de la película donde tiene lugar la conducción de calor (Castillo-Santos *et al.*, 2017; Viollaz *et al.*, 1980) (Apéndice A).

Si la resistencia interna a la transferencia de calor es despreciable ( $D \gg h$ ), entonces  $H = h$ . La temperatura promedio dentro del sólido se define como

$$\mathbf{T} = \frac{\int_V T dV}{\int_V dV} \quad (5.20)$$

donde  $\mathbf{T}$  representa la distribución de temperatura dentro del sólido. La temperatura promedio se puede estimar como se muestra en el Apéndice A.

El modelo considera que el sistema está sometido a una irradiación ultrasónica  $P$ , dividida entre la fase fluida y sólida de acuerdo a la fracción  $f$ . Las Ecuaciones 5.14 y 5.18 se pueden arreglar de la siguiente manera asumiendo que  $\rho$ ,  $C_p$ ,  $V$  y  $\varepsilon$  se mantienen constantes.

$$\tau_1 \frac{d\Theta_1}{dt} + \Theta_1 = K_{11}\Theta_0 + K_{12}P + K_{13}\theta \quad (5.21)$$

$$\tau_2 \frac{dT}{dt} + T = K_{21}\Theta_1 + K_{22}P \quad (5.22)$$

$$K_{11} = \frac{1}{1 + \frac{US}{\rho_\infty C p_\infty F}}; K_{12} = \frac{f}{\rho_\infty C p_\infty F + US}; K_{13} = \frac{US}{\rho_\infty C p_\infty F + US} \quad (5.23)$$

$$K_{21} = 1; K_{22} = \frac{1-f}{HA} \quad (5.24)$$

$$\tau_1 = \frac{\varepsilon V}{F + \frac{US}{\rho_\infty C p_\infty}}; \tau_2 = \frac{\rho_s C p_s (1-\varepsilon)V}{HA} \quad (5.25)$$

Las Ecuaciones 5.21 y 5.22 pueden reescribirse en términos de variables de desviación o perturbación para representar el cambio alrededor de un punto de operación nominal (un método comúnmente usado en ingeniería de control); por lo tanto, sus condiciones iniciales se vuelven cero. A continuación se muestra la aplicación de la transformada de Laplace a los rendimientos resultantes del modelo.

$$\Theta_1'(s) = \frac{K_{11}}{\tau_1 s + 1} \Theta_0'(s) + \frac{K_{12}}{\tau_1 s + 1} P'(s) + \frac{K_{13}}{\tau_1 s + 1} \theta'(s) \quad (5.26)$$

$$T'(s) = \frac{K_{21}}{\tau_2 s + 1} \Theta_1'(s) + \frac{K_{22}}{\tau_2 s + 1} P'(s) \quad (5.27)$$

donde el apóstrofe indica que la transformada de Laplace se aplica a una variable de desviación. La combinación de las Ecuaciones 5.26 y 5.27) produce

$$T'(s) = G_1(s) \Theta_0'(s) + G_2(s) P'(s) + G_3(s) \theta'(s) + G_4(s) P'(s) \quad (5.28)$$

$$G_j(s) = \frac{K_{21}}{\tau_2 s + 1} \frac{K_{1j}}{\tau_1 s + 1} \text{ For } j = 1, 2, 3; G_4(s) = \frac{K_{22}}{\tau_2 s + 1} \quad (5.29)$$

De acuerdo a la Ecuación 5.28, la solución es la suma de la respuesta de salida de un sistema de primer orden,  $G_4(s)$ , y tres sistemas de primer orden en serie,  $G_j(s) (j = 1, 2, 3)$ . Las funciones de transferencia involucradas en la Ecuación 5.28 tienen las siguientes formas generales

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (5.30)$$

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (5.31)$$

Las respuestas transitorias al escalón de magnitud  $M$  para las Ecuaciones 5.30) y (5.31), respectivamente son las siguientes:

$$Y(t) = KM \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \quad (5.32)$$

$$Y(t) = KM \left[ 1 - \left( \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \left( \frac{1}{\tau_2} e^{-t/\tau_1} - \frac{1}{\tau_1} e^{-t/\tau_2} \right) \right] \quad (5.33)$$

Por lo tanto, la solución requerida es

$$T = T_0 + (K_{21}K_{11}M_1 + K_{21}K_{12}M_2 + K_{21}K_{13}M_3) \times \dots \quad (5.34)$$

$$\left[ 1 - \left( \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \left( \frac{1}{\tau_2} e^{-t/\tau_1} - \frac{1}{\tau_1} e^{-t/\tau_2} \right) \right] + K_{22}M_2 \left( 1 - e^{-t/\tau_2} \right)$$

con

$$M_1 = \Theta_0 - \Theta_1; M_2 = P; M_3 = \theta - \Theta_1 \quad (5.35)$$

La Ecuación 5.34 representa la solución en estado estacionario

$$T_{ss} = T_0 + K_{21}K_{11}M_1 + (K_{21}K_{12} + K_{22})M_2 + K_{21}K_{13}M_3 \quad (5.36)$$

Los términos  $K_{21}K_{11}$  ( $^{\circ}C/^{\circ}C$ ),  $K_{21}K_{12} + K_{22}$  ( $^{\circ}C/W$ ) y  $K_{21}K_{13}$  ( $^{\circ}C/^{\circ}C$ ) representan las ganancias de estado estable para las entradas  $\Theta_0$ ,  $P$  y  $\theta$ , respectivamente. Las cuales indican el cambio esperado en la temperatura del sólido por unidad de cambio en las entradas.

### 5.2.1.2. Dinámica despreciable de la fase fluida

La dinámica de la fase fluida descrita por la Ecuación 5.21 puede despreciarse cuando  $\Theta_0 = \Theta_1$ . Es decir, el flujo de calor transferido al medio circundante es mucho menor que el flujo energía alimentada ( $US \ll \rho_{\infty}C_{p\infty}F$ ,  $K_{11} \rightarrow 1$ ,  $K_{13} \rightarrow 0$ ), la irradiación del ultrasonido absorbida por la fase líquida es insignificante en comparación con la energía alimentada ( $f \ll \rho_{\infty}C_{p\infty}F$ ,  $K_{12} \rightarrow 0$ ), y el tiempo de residencia del líquido es muy pequeño ( $V \ll F$ ,  $\tau_1 \rightarrow 0$ ). Entonces la Ecuación 5.34 se reduce a

$$T = T_0 + (K_{21}M_1 + K_{22}M_2) \left( 1 - e^{-t/\tau_2} \right) \quad (5.37)$$

Por otro lado, la Ecuación 5.21 también se puede despreciar si se cumplen las 3 siguientes condiciones:

1. La fase fluida ha alcanzado una temperatura de estado estable con entradas  $\Theta_0$ ,  $P$  y  $\theta$
2. El sólido no está inicialmente sumergido en el fluido y
3. La relación de masa fluido-sólido es lo suficientemente grande como para permitir un cambio insignificante de la temperatura del fluido

### 5.2.1.3. Evaluación de la potencia ultrasónica absorbida por el sólido

Kiani *et al.* (2012) propusieron el siguiente modelo para describir la transferencia de calor dentro de una esfera sólida sumergida en un fluido

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\alpha_s}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (5.38)$$

La Ecuación 5.38 se resolvió considerando la siguiente condición de frontera

$$-ks \frac{\partial T_i}{\partial r} = h(T_i - \Theta_1) + Q \quad (5.39)$$

De acuerdo a la Ecuación 5.39, el flujo de energía transferido de la superficie al sólido por conducción resultada de la suma de la energía transferida hacia la superficie sólida por convección del fluido y el calor irradiado por el ultrasonido ( $Q$ ). La solución propuesta (Ecuación 5.40) se realiza considerando una resistencia interna insignificante a la transferencia de calor y una distribución inicial homogénea de la temperatura dentro del sólido (la solución se presenta con la nomenclatura del estudio actual)

$$T = T_0 + \left( K_{21}M_1 + \frac{Q}{h} \right) \left( 1 - e^{-t/\tau_2} \right) \quad (5.40)$$

Comparando las Ecuaciones 5.37 y 5.40) indican que

$$QA = (1 - f)P \quad (5.41)$$

Por lo tanto, la Ecuación 5.40 es, de hecho, la solución de

$$\frac{d(\rho_s C p_s (1 - \varepsilon) VT)}{dt} = hA (\Theta_1 - T) + QA \quad (5.42)$$

La Ecuación 5.42 es equivalente a la Ecuación 5.18 considerando una dinámica despreciable de la fase fluida (líquida) y una resistencia interna insignificante a la transferencia de calor ( $H = h$ ). Cuando la resistencia interna a la transferencia de calor no puede considerarse como despreciable, el efecto de la geometría del sólido se puede incluir en la Ecuación 5.18 a través del coeficiente de transferencia de calor interna ( $D$ ). En este caso, el calor irradiado por el ultrasonido ( $Q$ ) se refiera a la entrada forzada al sistema (*forcing input*), se debe tener en cuenta que el uso de una propiedad intensiva como una entrada forzada (*forcing input*) puede provocar errores físicos potenciales en la solución del modelo. En este caso, por ejemplo, la potencia ultrasónica entregada por el transductor ( $QA$ ) puede ser ajustada cambiando la superficie sólida ( $A$ ) y podría aumentar más allá de las especificaciones técnicas del equipo. Por lo tanto, la forma de la Ecuación 5.18 es más adecuada

que la Ecuación 5.42, incluso si son matemáticamente equivalentes.

Kiani *et al.* (2012) desarrollaron un procedimiento para evaluar el efecto de calentamiento del ultrasonido en la superficie de la esfera. Los autores consideraron que después de la irradiación con ultrasonido (con la esfera sólida en equilibrio térmico con el fluido), el calor generado en la superficie de la esfera hará que la temperatura de ésta aumente ( $\Theta_1 = T$  en  $t = 0$ ). Por lo tanto, el efecto de calentamiento se calcula como:

$$(1 - f)P = QA = \rho_s C p_s (1 - \varepsilon) V \frac{\Delta T_{US}}{\Delta t} \quad (5.43)$$

donde  $\Delta T_{US}$  es el aumento de temperatura causada por la irradiación con ultrasonido. Los autores utilizaron un baño circular (-10°C) para evitar el efecto de la generación de calor en el fluido. Además, la medición de la temperatura se realizó por un corto tiempo (10 s) con el fin de desprestigiar la transferencia de calor entre el sólido y fluido. No se presenta ningún análisis adicional para probar la validez de los supuestos.

Las Ecuaciones 5.14 y 5.15 pueden describir la configuración experimental utilizada por Kiani *et al.* (2012). De acuerdo a la Ecuación 5.36, la irradiación con ultrasonido provoca un aumento directo ( $K_{22}$ , potencia ultrasónica absorbida por el sólido) e indirecto ( $K_{21}K_{12}$ , transferencia de energía a través del fluido) de la temperatura del sólido. La relación de estado estacionario entre contribuciones indirectas y directas es

$$R_{ss} = \frac{K_{21}K_{12}}{K_{22}} = \frac{HAf}{(1 - f)(\rho_\infty C p_\infty F + US)} \quad (5.44)$$

Sin embargo, en condiciones de estado inestable, la relación entre estas contribuciones cambiará de acuerdo con las constantes de tiempo  $\tau_1$  y  $\tau_2$ . El ratio del tiempo promedio durante un cierto tiempo de operación es

$$\langle R \rangle = \frac{\frac{K_{21}K_{12}}{K_{22}} \int_0^t \frac{\left[ 1 - \left( \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \right) \left( \frac{1}{2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \frac{1}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right) \right]}{\left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right)} dt}{t} \quad (5.45)$$

Por lo tanto, la potencia ultrasónica absorbida por el sólido corregida por los efectos de convección es

$$(1 - f)P = \frac{1}{1 + \langle R \rangle} \rho_s C p_s V (1 - \varepsilon) \frac{dT}{dt} \quad (5.46)$$

Para una dinámica despreciable de la fase fluida (el líquido ha alcanzado una temperatura de estado estacionario mientras se aplica la irradiación ultrasónica antes de que el sólido se sumerja,

$\Theta_1 \neq T$  en  $t = 0$ ), entonces

$$R = \frac{K_{21}M_1}{K_{22}M_2} = \frac{HA(\Theta_1 - T_0)}{(1-f)P} \quad (5.47)$$

El valor de  $R$  permanece constante a lo largo del proceso debido a que los términos  $K_{21}M_1$  y  $K_{22}M_2$  tienen la misma dinámica de acuerdo a la Ecuación 5.37.

### **5.2.2. Desarrollo de una correlación de transferencia de calor para un proceso asistido con ultrasonido.**

En la Tabla , se presentan los factores y niveles evaluados en esta sección. Se realizaron un total de 135 tratamientos (405 experimentos) para desarrollar la correlación de transferencia de calor; mientras que se realizaron 26 tratamientos (78 experimentos) para validar el modelo propuesto.

Tabla 5.3. Factores y niveles evaluados.

# experimento	Objetivo	Medio de inmersión	Geometría ( $x_1$ )	Temperatura del fluido ( $^{\circ}\text{C}$ , $x_2$ )	Velocidad del fluido ( $\times 10^3$ m/s, $x_3$ )	Nivel de potencia ultrasónica (% , $x_4$ )	Diseño factorial ( $L_1 \times L_2 \times L_3 \times L_4$ )	Número de tratamientos
1	Desarrollo de la correlación de transferencia de calor	Agua	Cubo, esfera, cilindro	5, 15, 30, 45, 60	0.93, 1.86, 5.00	0, 30, 100	3×5×3×3	135
2	Validación del modelo	EGA†	Cubo, esfera	-5, 0	1.86	0, 100	2×2×1×2	8
3	Validación del modelo	CCA*	Esfera, cilindro	-5, 0, 5	1.86	0, 30, 100	2×3×1×3	18

†EGA: Etilenglicol-agua (1:1 V/V). \*CCA: Solución acuosa de  $\text{CaCl}_2$  (30 g/L).

La transferencia de calor entre una esfera y un fluido se representa muy a menudo en términos de los números de Nusselt ( $Nu$ ), Reynolds ( $Re$ ) y Prandtl ( $Pr$ ) mediante la Ecuación 5.48 (Incropera & DeWitt, 1996):

$$Nu = 2 + aRe^bPr^c \quad (5.48)$$

$$Nu = \frac{hL_c}{k_\infty} \quad (5.49)$$

$$Re = \frac{\rho_\infty v L_c}{\mu_\infty} \quad (5.50)$$

$$Pr = \frac{Cp_\infty \mu_\infty}{k_\infty} \quad (5.51)$$

donde todas las propiedades termo-físicas fueron evaluadas a una temperatura de película. La longitud característica de convección se considera el radio de la esfera. Para sólidos no esféricos, la longitud de convección se considera como el diámetro de una esfera con la misma superficie que el sólido dado (Geankoplis, J., 2003).

El ultrasonido puede afectar la turbulencia del flujo de un fluido que rodea a un sólido debido a los efectos de la cavitación (Bulliard-Sauret *et al.*, 2019; Dhanalakshmi *et al.*, 2012), mejorando el número de  $Re$  y por lo tanto el número de  $Nu$  para un proceso asistido con ultrasonido. Por lo tanto, en este estudio se propone un número de Nusselt aparente ( $Nu_{app}$ ) en un proceso asistido con ultrasonido se puede escribir como la suma de las contribuciones de los efectos de la convección forzada ( $Nu$ ) y la cavitación ( $Nu_{US}$ )

$$Nu_{app} = Nu + Nu_{US} \quad (5.52)$$

$$Nu_{US} = ARe_{US}^B Pr^C \quad (5.53)$$

donde  $Re_{US}$  es una función de la intensidad o potencia ultrasónica. La Ecuación 5.53 carece del número 2 que se encuentra en la Ecuación 5.48 (lado izquierdo), debido a que el límite convección natural de transferencia de calor entre el fluido y una esfera sumergida ya se considera en esta última ecuación. El número de  $Re_{US}$  puede verse como el efecto de la aplicación del ultrasonido sobre la turbulencia del fluido. La siguiente expresión se propone para relacionar el número de  $Re_{US}$  con la intensidad y/o potencias ultrasónica.

$$Re_{US} = D \left( \frac{IU}{IU_{ref}} \right)^E = D \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)^E \quad (5.54)$$

La combinación de las Ecuaciones 5.48, 5.52 y 5.54 produce

$$Nu_{app} = 2 + aRe^b Pr^c + A \left( D \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)^E \right)^B Pr^C = 2 + aRe^b Pr^c + d \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)^e Pr^C \quad (5.55)$$

donde  $d = AD^B$  y  $e = EB$ . Si  $c = C$  (el ultrasonido no cambia el efecto del número de  $Pr$  sobre el coeficiente de transferencia de calor), entonces

$$Nu_{app} = 2 + \left( aRe^b + d \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)^e \right) Pr^c \quad (5.56)$$

Por otro lado, si  $C = 0$  (el ultrasonido no interactúa con las propiedades del fluido para afectar el coeficiente de transferencia de calor), entonces

$$Nu_{app} = 2 + aRe^b Pr^c + d \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)^e \quad (5.57)$$

La Ecuación 5.57 es similar al enfoque propuesto empíricamente por Kiani *et al.* (2013b) para describir el efecto de la irradiación con ultrasonido sobre el valor del coeficiente de transferencia de calor, pero con el parámetro  $e = 1$ .

El coeficiente de transferencia de calor ( $h$ ) se estimó a través de la gráfica de  $T$  vs.  $t$  ajustando la Ecuación 5.37 a los datos experimentales. Los valores del coeficiente de transferencia de calor se expresaron en términos del número de  $Nu$ . Las propiedades termo-físicas ( $\rho$ ,  $C_p$ ,  $\mu$  y  $k$ ) del agua, la mezcla de etilenglicol y agua (1: 1 V/V) y la solución acuosa de  $CaCl_2$  (30 g/L) se calcularon de acuerdo con a los datos proporcionados por Choi & Okos (1986), Flick (1999) y Conde (2004), respectivamente. Finalmente, las correlaciones de  $Nu_{app}$  se ajustaron a los números experimentales de  $Re$  y  $Pr$ , así como al término de irradiación ultrasónica para determinar los coeficientes desconocidos ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , y  $e$ ).

### 5.2.3. Desarrollo del modelo de transferencia de calor durante el calentamiento asistido con ultrasonido a tiempos cortos y temperaturas moderadas del jamón curado.

Un modelo de conducción con un término de fuente ultrasónica y la correlación de  $Nu$  propuesta (Ecuación 5.56) fueron utilizados para el análisis de las cinéticas de calentamiento a tiempos cortos y temperaturas moderadas de jamón curado, las cuales fueron reportadas en la literatura por Contreras *et al.* (2018), quienes intensificaron la transferencia de calor mediante la aplicación del ultrasonido durante el tratamiento térmico suave de jamón curado sumergido en agua. Los expe-

rimentos se llevaron a cabo empaquetando las lochas de jamón curado en seco (0.2 m × 0.1 m × 0.02 m) de dos músculos principales (*Biceps femoris* y *Semimembranosus*) en bolsas de poliamida/polietileno. Los experimentos de calentamiento se realizaron en un baño de ultrasonido (15 L, 20 kHz, 600 W) a diferentes temperaturas (40, 45 y 50 ° C). La temperatura del baño se controló externamente mediante un recirculador, con un flujo de 3.5 L/min. La composición del jamón fue de entre el 2.4% y 16.2% de grasa y entre el 2.8% y 8.6% en sal, con un contenido de humedad del 52%. La temperatura central de la muestra se registro por medio de un termopar tipo T. Para el presente estudio solo se consideraron la cinéticas de temperatura del músculo *Semimembranosus*.

El calentamiento del jamón curado se modeló utilizando la ecuación de conducción en estado no estacionario.

$$\frac{\partial (\rho_s C p_s T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( k_s \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{(1-f)P}{(1-\varepsilon)V} \quad \text{For } -L \leq z \leq L \quad (5.58)$$

$$-k_s \frac{\partial T_i}{\partial z} = h(T_i - \Theta_1) \quad \text{For } z = L, t > 0 \quad (5.59)$$

La Ecuación 5.58 incluye el término de fuente que considera que el producto puede aumentar su temperatura debido a la energía ultrasónica absorbida. La transferencia de calor a lo largo de las direcciones  $x$  y  $y$  se depreciaron debido a las condiciones del proceso y las dimensiones del producto (la diferencia relativa entre las soluciones 1D y 3D en el centroide del producto fue inferior al 0.1% en cualquier momento, según lo estimado a partir de la solución analítica de la ecuación de conducción sin término fuente). El modelo de transferencia de calor desarrollado en la sección 4.2.1 no se utilizó en esta sección debido a que la evaluación realizada de la temperatura promedio en un producto en forma de placa plana con resistencia interna a la transferencia de calor, requiere al menos cuantificar la temperatura en dos posiciones, como se muestra en el Apéndice A, y en este caso solo estaba disponible la medición de la temperatura del centro. Las ecuaciones reportadas por Choi & Okos (1986) se utilizaron para describir la variabilidad de la densidad, el calor específico y la conductividad térmica del producto con la temperatura (con una composición promedio en base húmeda de 9.3% para grasa, 5.7% para sal, 52% para agua y 33% para proteínas). El coeficiente de transferencia de calor se calculó a partir de la correlación de Nusselt (Ecuación 5.56). Las Ecuaciones 5.58 y 5.59 carecen de una solución analítica bajo propiedades variables y, por lo tanto, se resolvieron numéricamente por el método de líneas, es decir, las ecuaciones diferenciales parciales (EDP) se transforman en un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) solo discretizando las derivadas espaciales. El modelo de transferencia de calor se utilizó para simular la temperatura central del jamón curado, así como para evaluar la fracción de energía ultrasónica absorbida por el producto considerando una distribución uniforme de la temperatura inicial. Los valores promedio de temperatura para el coeficiente de transferencia de calor, la conductividad tér-

mica y la difusividad térmica ( $\alpha_s = k_s/\rho_s C_{ps}$ ) del producto a lo largo del proceso, se estimaron de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$x_{av} = \frac{\int_{T_0}^{\Theta_1} x dT}{\int_{T_0}^{\Theta_1} dT} = \frac{\int_{T_0}^{\Theta_1} x dT}{\Theta_1 - T_0} \quad (5.60)$$

donde  $x$  representa el promedio de las variables ( $h$ ,  $k_s$  o  $k_s/\rho_s C_{ps}$ ). Finalmente, los valores de  $h_{av}$  y  $k_{av}$  fueron utilizados para estimar el número de Biot promedio del proceso,

$$Bi_{av} = \frac{h_{av}L}{k_{s,av}} \quad (5.61)$$

#### 5.2.4. Validación de la correlación propuesta de Nusselt

El valor de los coeficientes de transferencia de calor ( $h$ ) se encontraron en un rango de 368.6-1887 ( $14.4 \leq Nu \leq 89.5$ ), 562.1-2508.5 ( $22.2 \leq Nu \leq 98.7$ ) y 409.0-1386.8 ( $16.4 \leq Nu \leq 107.1$ )  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$  para los diferentes niveles de potencia de ultrasónica utilizada 0, 30 y 100 %, respectivamente, mientras que los números de Reynolds y Prandtl correspondientes estaban en los rangos 15.2-215.2 y 4.3-8.5, respectivamente. Los coeficientes de transferencia de calor se ajustaron asumiendo una cantidad insignificante de energía ultrasónica absorbida por las geometrías de cobre, es decir,  $K_{22} = 0$  en la Ecuación 5.37, así como también una resistencia interna despreciable a la transferencia de calor ( $D \gg h$ ,  $H \approx h$ ). La relación de las contribuciones de los mecanismos de convección e irradiación del ultrasonido sobre el calentamiento del sólido se puede estimar a través de la Ecuación 5.47, suponiendo que la energía absorbida por el sólido es proporcional a su fracción de volumen, es decir  $1-f \approx 1-\epsilon$ . En este caso, el mecanismo de convección contribuye entre el 87 y el 98 % al aumento de temperatura (para el escenario más desfavorable que ocurre cuando se tiene un valor del  $h = 420 W/m^2 \text{ } ^\circ C$ , el cual es un valor por debajo del límite más bajo de los obtenidos durante el proceso con ultrasonido). Por otro lado, la contribución más baja del mecanismo de convección ocurre cuando se utiliza el 100 % de la potencia ultrasónica y la diferencia mas baja de temperatura entre el sólido y fluido ( $5 \text{ } ^\circ C$ ). La contribución del mecanismo de convección a la transferencia de calor en el límite más bajo aumenta un 91 y 93 % para los casos en que la diferencia de temperatura (entre el sólido y fluido) aumenta a  $10 \text{ } ^\circ C$  y el nivel de potencia ultrasónica se reduce al 30 %, respectivamente. Por lo tanto, suponer como despreciable la cantidad de energía ultrasónica absorbida por el sólido, permite simplificar el problema sin incurrir en un error significativo.

De acuerdo a Incropera & DeWitt (1996) , la suposición de una distribución uniforme de la temperatura dentro del sólido es adecuada si el número de Biot es menor a 0.1. Para la esfera de cobre el número de Biot más alto esperado es de 0.044 ( $k_s = 406 W/m \text{ } ^\circ C$ ,  $R = 0.01 m$ ,  $h =$

1800 W/m<sup>2</sup>°C), por lo tanto, no es necesario realizar mediciones de temperatura en la superficie del sólido. El error más alto por no considerar el mecanismo de conducción en la estimación del coeficiente de transferencia de calor por convección es de aproximadamente 1.5 %, esto de acuerdo, a los parámetros de geometría de la Tabla 5.4 y Ecuación 1.9. El efecto de considerar despreciable tanto al mecanismo de conducción, como a la energía ultrasónica absorbida por el sólido, no es aditivo, ya que la contribución de la irradiación del ultrasonido se maximiza para los bajos valores de  $h$ , mientras que los perfiles de temperatura aumentaron con valores de  $h$  altos.

La teoría desarrollada permite analizar el experimento diseñado por Kiani *et al.* (2012) para evaluar la energía ultrasónica absorbida por el sólido. En este caso, la contribución del mecanismo de convección e irradiación del ultrasonido sobre el calentamiento del sólido no es constante. Una contribución promedio de los mecanismos de convección e irradiación ultrasónica a la transferencia de calor durante un cierto tiempo se puede estimar a partir de la Ecuación 5.45. Para un tiempo de 10 s, el mecanismo de convección contribuye entre el 15 % y el 30 % al aumento de temperatura observado en el experimento diseñado por Kiani *et al.* (2012), de acuerdo a la estimación de los datos disponibles ( $h = 800 \text{ W/m}^2/\text{°C}$ , esferas de cobre de 0.01 y 0.02 m de diámetro, flujos volumétricos de  $2.50 \times 10^{-5}$  y  $1.67 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ) y algunos valores asumidos ( $U = 0 \text{ W/m}^2/\text{°C}$  y  $f = \varepsilon$ ). Por lo tanto, la Ecuación 5.45 representa una herramienta valiosa para analizar las condiciones experimentales si se determinará la cantidad de energía ultrasónica absorbida por el sólido.

Un ajuste preliminar de la Ecuación 5.48 con los datos experimentales de Nusselt obtenidos para los tres niveles de potencia ultrasónica demostraron no ser adecuados para describir los valores de transferencia de calor en un proceso asistido con ultrasonido (Figura 5.8, Tabla 5.4), mostrando una dependencia decreciente del número de Reynolds a medida que aumentaba la potencia ultrasónica (parámetro  $b$  se vuelve más pequeño).

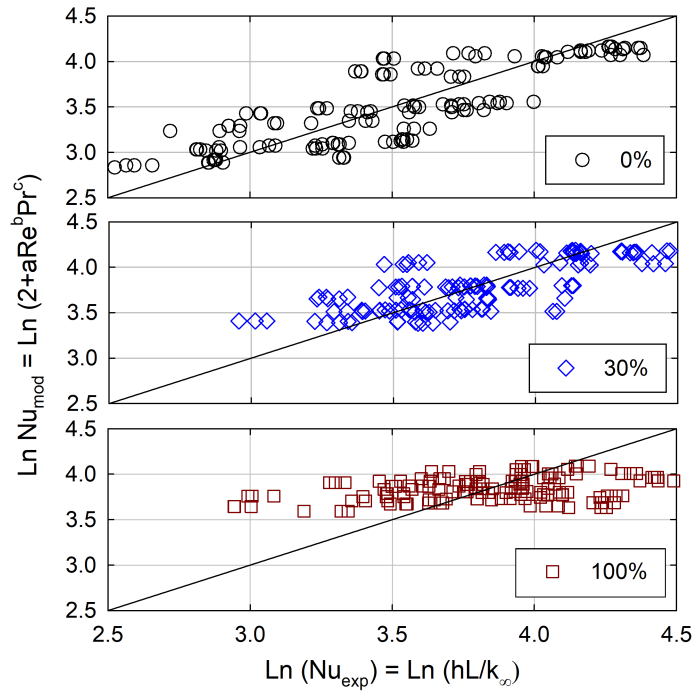


Figura 5.8. Comparación entre el número de Nusselt experimental con el ajustado a diferentes niveles de potencia ultrasónica.

En este caso, la dependencia de  $Nu$  sobre el número de  $Pr$  ( $c = 0.4$ ), se obtuvo a partir de Whitaker (1972), debido a que el conjunto de datos experimentales no cubría un amplio rango de  $Pr$  para permitir una estimación significativa del parámetro relacionado ( $p > 0.05$ ).

Tabla 5.4. Parámetros que describen el efecto de la convección forzada sobre el coeficiente de transferencia de calor.

$P$ (%)	$\phi_s$	$a^*$	$b^*$	$R^2$	$MRD$ (%)
0	0	$1.11 \pm 0.30$	$0.64 \pm 0.07$	0.68	6.70
30	0	$4.02 \pm 0.93$	$0.40 \pm 0.06$	0.54	4.98
100	0	$10.77 \pm 3.50$	$0.17 \pm 0.08$	0.11	6.95

\*Los parámetros fueron estimados con la Ecuación 5.47 con  $c = 0.4$ . Los resultados se presentan como la estimación del parámetro  $\pm 95\%$  intervalo de confianza.

De acuerdo con la Figura 5.9a, la aplicación del ultrasonido a un 30% (319 W, 4611 W/m<sup>2</sup>) provocó un aumento significativo del número de Nusselt (y por lo tanto, del coeficiente de transferencia de calor) en comparación con los experimentos realizados sin ultrasonido para  $Nu \leq 50$  ( $h \geq 1000$

$\text{W/m}^2\text{C}$ , símbolos que aparecen sobre la línea de referencia). Por encima de este límite, el efecto del ultrasonido se vuelve insignificante sobre la transferencia de calor. Estos experimentos se realizaron con la velocidad de flujo más alta ( $5 \times 10^{-3}$  m/s), es decir a un número de Reynolds superior a 100. A una potencia ultrasónica del 100% (478 W,  $6914 \text{ W/m}^2$ ) no se observó una mejora de la transferencia de calor más allá de los niveles observados para un 30% de potencia (Figura 5.9b).

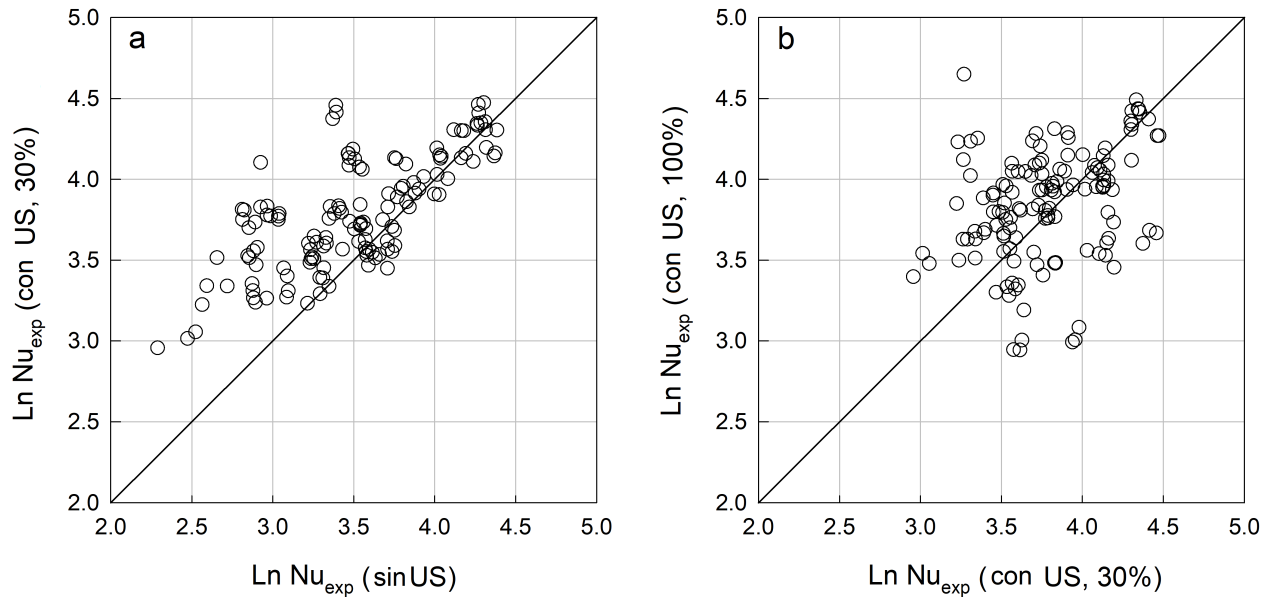


Figura 5.9. Efecto de la potencia ultrasónica sobre el valor experimental del número de Nusselt.

Por lo tanto, la aplicación del ultrasonido a una alta potencia y en combinación con un alto flujo no mejorará la transferencia de calor en comparación con un proceso no irradiado (5.10). Kiani *et al.* (2015) reportaron un aumento lineal del coeficiente de transferencia de calor a lo largo de un ciclo de trabajo de 0 a 70%, después de éste se alcanzó un valor constante, es decir, la aplicación del ultrasonido tiene un nivel de potencia límite para mejorar la transferencia de calor.

Delouei *et al.* (2019) investigaron el impacto de la vibración ultrasónica sobre la caída de presión y la mejora de la transferencia de calor en un flujo turbulento de entrada. Estos autores demostraron que el aumento del número de Reynolds condujo a rendimientos decrecientes en la mejora de la transferencia de calor cuando fue aplicado el ultrasonido. Por lo tanto, las interacciones existentes entre la velocidad característica del campo acústico y la velocidad del flujo son parámetros críticos que controlan la capacidad del ultrasonido para mejorar la transferencia de calor.

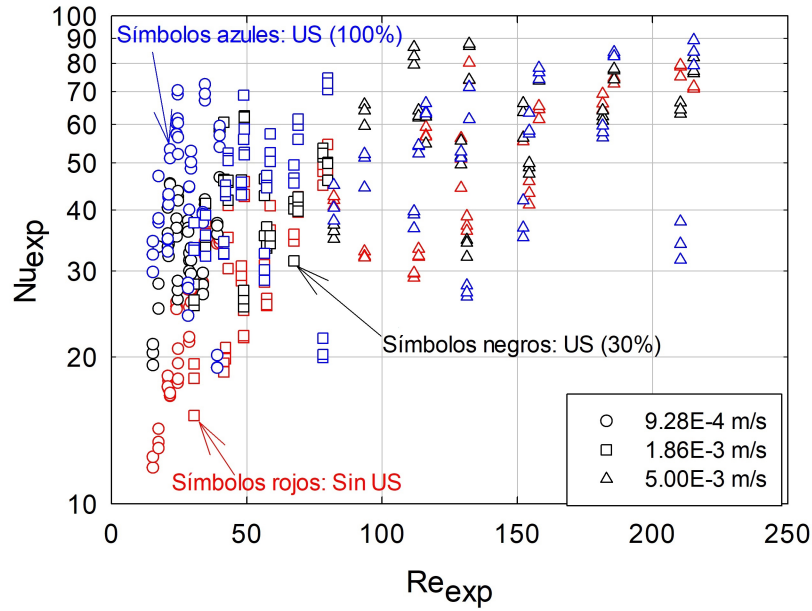


Figura 5.10. Efecto del número de  $Re$  sobre el número de  $Nu$  experimental para el enfriamiento/calentamiento asistido con ultrasonido de un cubo, esfera y cilindro de cobre inmersos en agua (5 a 60°C) a diferentes velocidades del fluido y niveles de potencia ultrasónica. Los ajustes del 30 y 100% de potencia ultrasónica corresponde a una  $IU$  de 4611 y 6913  $W/m^2$ , respectivamente.

Los datos experimentales para el proceso irradiado con ultrasonido a un nivel de potencia ultrasónica del 30% se ajustaron para estimar los parámetros  $d$  y  $e$  en las Ecuaciones 5.56 y 5.57 (Table 5.5).

Tabla 5.5. Parámetros que describen el efecto del ultrasonido sobre el coeficiente de transferencia de calor.

Caso	$d^*$	$e^* \dagger$	$R^2$	$MRD (\%)$
$C = c$	$5.45 \pm 0.81$	1	0.51	5.06
$C = 0$	$11.44 \pm 1.66$	1	0.52	5.01

\*Parámetros estimados a partir de la Ecuación 5.55 utilizando las constantes  $a$  y  $b$  considerando una potencia ultrasónica del 0% de la Tabla 5.4. Los resultados se presentan como la estimación del parámetro  $\pm$  intervalo de confianza del 95%.

†El parámetro no fue estadísticamente diferente de 1 para el procedimiento inicial de ajuste y, por lo tanto, se fijó durante el análisis de regresión.

La constante  $e$  no fue significativamente diferente de 1 ( $p > 0.05$ ) y, por lo tanto, se estableció

en este valor durante un procedimiento de regresión posterior. Las ecuaciones de  $Nu$  propuestas lograron una reproducción satisfactoria de los datos experimentales como se muestra en la 5.11.

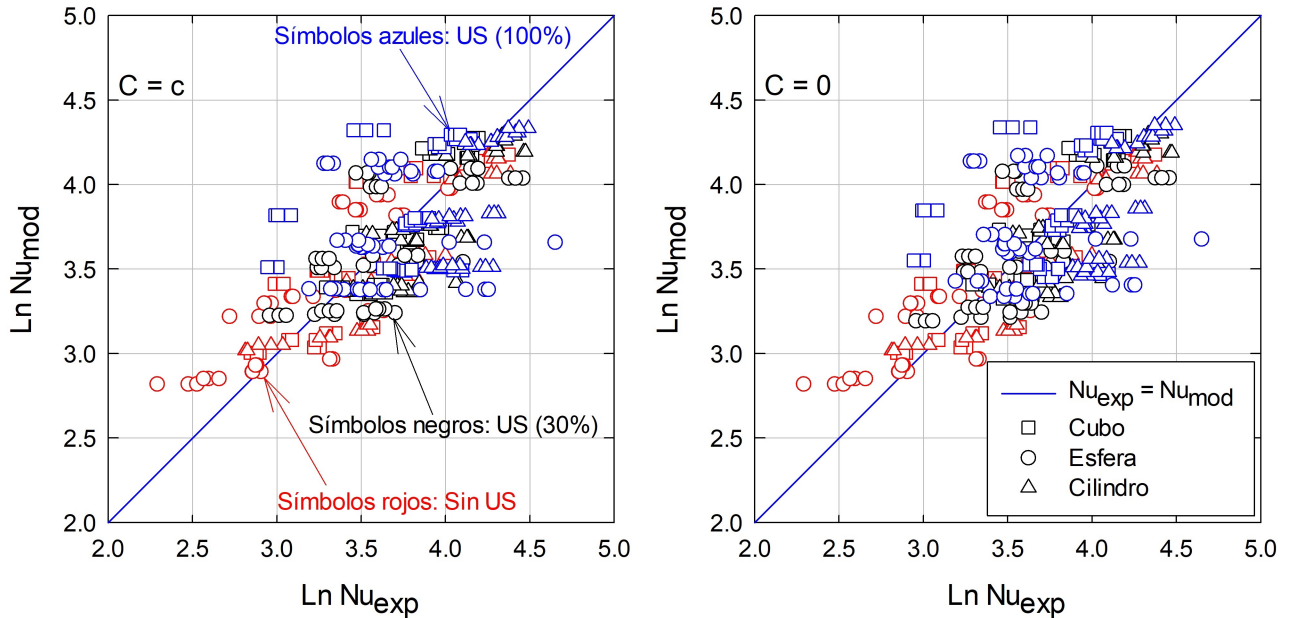


Figura 5.11. Ajuste de la ecuación de correlación de transferencia de calor propuesta para el enfriamiento/calentamiento asistido con ultrasonido de un cubo, esfera y cilindro de cobre inmersos en agua. Los ajustes del 30 y 100% de potencia ultrasónica corresponden a una  $IU$  de 4611 y 6914  $W/m^2$ , respectivamente. Condiciones de proceso: 5 a 60°C;  $15.2 \leq Re \leq 215.2$ ;  $4.3 \leq Pr \leq 8.5$ .

Ajuste de la ecuación de correlación de transferencia de calor propuesta para el enfriamiento/calentamiento asistido con ultrasonido de un cubo, esfera y cilindro de cobre inmersos en agua. Los ajustes del 30 y 100% de potencia eléctrica corresponden a una  $IU$  de 4611 y 6914  $W/m^2$ , respectivamente. Condiciones de proceso: 5 a 60°C;  $15.2 \leq Re \leq 215.2$ ;  $4.3 \leq Pr \leq 8.5$ .

La capacidad de predicción de estas correlaciones se probaron con datos experimentales de los conjuntos 2 y 3 (Tabla 5.3) y se compararon con el modelo propuesto por Kiani *et al.* (2013b). Los modelos fueron probados en los rango de  $9.1 \leq Re \leq 18.4$  y  $23.5 \leq Pr \leq 34.5$  para la mezcla de etilenglicol-agua y de  $12.9 \leq Re \leq 29.9$  y  $11.2 \leq Pr \leq 18.8$  para la solución acuosa de  $CaCl_2$  (Figuras 5.12 y 5.13).

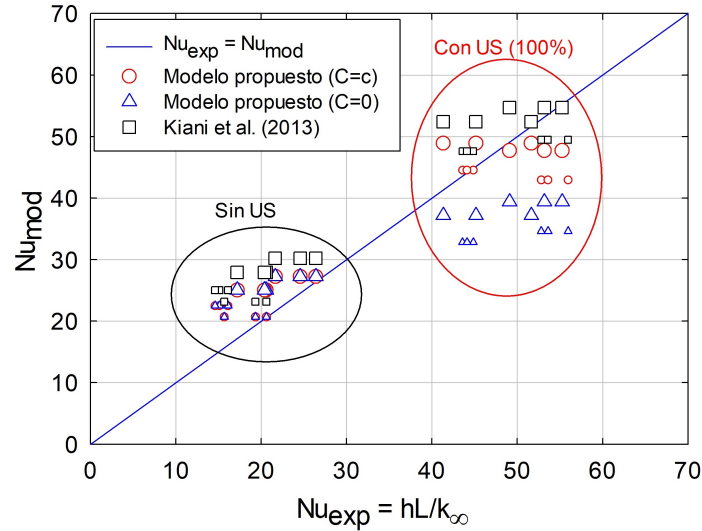


Figura 5.12. Capacidad de predicción de la correlación de transferencia de calor propuesta para el enfriamiento/calentamiento asistido con ultrasonido para una esfera y cubo de cobre inmersos en un solución de etilenglicol-agua (1: 1 V/V). Esfera: símbolos pequeños; cubo: símbolos grandes. El ajuste del 100 % de la potencia ultrasónica corresponde a una  $IU$  de  $4900 \text{ W/m}^2$ . Condiciones de proceso:  $0$  a  $5^\circ\text{C}$ ;  $9.1 \leq Re \leq 18.4$ ;  $23.5 \leq Pr \leq 34.5$ .

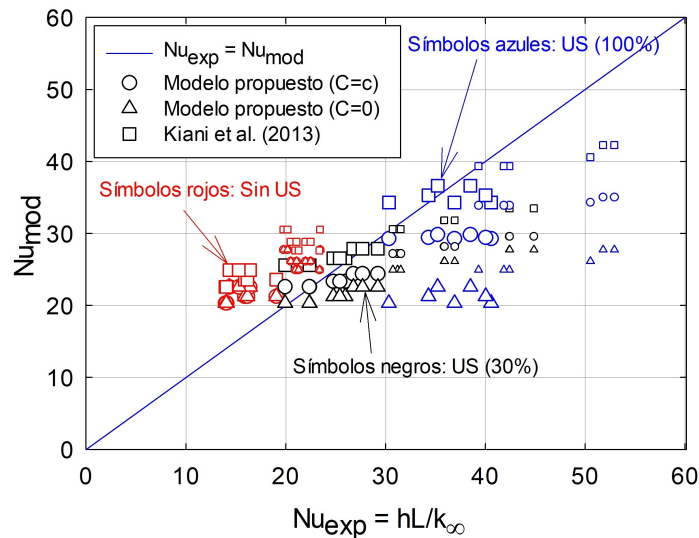


Figura 5.13. Capacidad de predicción de la correlación de transferencia de calor propuesta para el enfriamiento/calentamiento asistido con ultrasonido para una esfera y cilindro de cobre inmersos en un solución acuosa de  $\text{CaCl}_2$  (30 g/L). Esfera: símbolos grandes; cilindro: símbolos pequeños. El ajuste del 30 y 100 % de la potencia ultrasónica corresponde a una  $IU$  de  $600$  y  $2350 \text{ W/m}^2$ , respectivamente. Condiciones de proceso:  $-5$  a  $5^\circ\text{C}$ ;  $12.9 \leq Re \leq 29.9$ ;  $11.2 \leq Pr \leq 18.8$ .

Tanto la ecuación de  $Nu$  desarrollada por Kiani *et al.* (2013b) como la Ecuación 5.56 lograron un reproducción satisfactoria de los datos, con un rango  $MRD$  de 18 a 24% (Tabla 5.6), mientras que la Ecuación 5.57 mostró una desviación significativa del comportamiento experimental cuando se utilizó la solución acuosa de  $CaCl_2$  como medio de inmersión.

Tabla 5.6. Capacidad de predicción de la correlación de  $Nu$  propuesta para procesos asistidos con ultrasonido en diferentes medios de inmersión.

Medio*	Correlación de $Nu$	$MRD$ (%)	$R^2$
EGW	Propuesta ( $C = c$ )	18.2	0.90
EGW	Propuesta ( $C = 0$ )	26.2	0.88
EGW	Kiani <i>et al.</i> (2013b)	24.7	0.93
CCW	Propuesta ( $C = c$ )	23.6	0.81
CCW	Propuesta ( $C = 0$ )	31.2	0.21
CCW	Kiani <i>et al.</i> (2013b)	23.7	0.85

\*EGW: Etilenglicol-agua (1:1 V/V); CCW: Solución acuosa de  $CaCl_2$  (30 g/L)

### 5.2.5. Aplicación del modelo de transferencia de calor en un proceso de calentamiento asistido con ultrasonido a tiempos cortos y temperaturas moderadas de jamón curado

La cinética experimental y modelada del calentamiento del jamón curado, se presenta en la 5.14. El modelo de transferencia de calor se resolvió inicialmente asumiendo una cantidad despreciable de energía ultrasónica absorbida por la muestra (es decir,  $1-f = 0$ ), durante la simulación el valor del coeficiente de transferencia de calor fue evaluado a través de la Ecuación 5.56. Estos resultados (caso 1) se presenta por medio de la línea negra en la Figura 5.14.

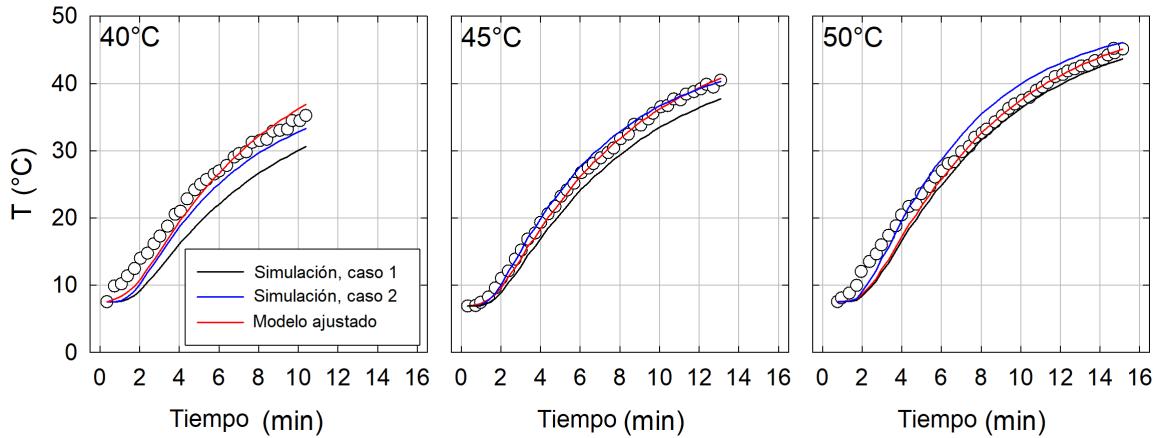


Figura 5.14. Comparación entre los datos experimentales (símbolos) y los modelados (líneas) durante el calentamiento a tiempos cortos y temperaturas moderadas de jamón curado asistido con ultrasonido. Simulaciones realizadas asumiendo una potencia ultrasónica insignificante absorbida por el sólido,  $1-f = 0$ . Caso 1:  $h$  obtenido a partir de la correlación de  $Nu$  (Ecuación 5.56). Caso 2: Resistencia externa insignificante a la transferencia de calor ( $h$ ,  $Bi$ ). El modelo ajustado corresponde a la estimación del término de fuente de ultrasonido ( $1-f$ ) con  $h$  obtenida de la correlación de  $Nu$  (Ecuación 5.56).

La velocidad de calentamiento calculada por la simulación fue más lenta que la experimental, con un retraso considerable a la temperatura más baja ( $8.4\% \leq MRD \leq 20\%$ ). El valor del coeficiente de transferencia de calor y la conductividad térmica promedio de sólido se encontraron en un rango 378 a 392  $W/m^2\text{°C}$  y 0.416 a 0.420  $W/m\text{°C}$ , respectivamente, lo que da como resultado un valor del número de Biot de 9.10 a 9.33, el cual aumenta con la temperatura en todos los casos (Tabla 5.7).

Tabla 5.7. Capacidad del modelo de transferencia de calor y la correlación de Nusselt propuesta para predecir el historial de temperatura durante el calentamiento a tiempos cortos y temperaturas moderadas de jamón curado asistido con ultrasonido.\*

$\Theta_1$	Simulación (case 1)					Simulación (case 2)		Estimación de la potencia ultrasónica absorbida por el sólido					
	$h_{av}$	$k_{s,av}$	$\alpha_{s,av} \times 10^7$	$Bi_{av}$	$R^2/MRD$	$R^2/MRD$	$h_{av}$	$k_{s,av}$	$\alpha_{s,av} \times 10^7$	$Bi_{av}$	$(1-f) \times 10^2$	$R^2/MRD$	
40	378.3	0.416	1.21	9.10	0.70/20.1	0.93/11.3	377.7	0.415	1.20	9.11	3.74±0.53	0.97/7.65	
45	385.0	0.417	1.21	9.22	0.96/8.83	0.99/3.08	384.0	0.416	1.21	9.23	1.73±0.15	1.00/2.56	
50	391.7	0.420	1.22	9.33	0.97/8.36	0.98/7.41	391.0	0.418	1.21	9.35	0.76±0.36	1.00/5.84	

\*Simulaciones realizadas asumiendo una potencia ultrasónica insignificante absorbida por el sólido,  $1-f = 0$ . Caso 1:  $h$  obtenido a partir de la correlación de  $Nu$  (Ecuación 5.56). Caso 2: Resistencia externa insignificante a la transferencia de calor ( $h \rightarrow \infty, Bi \rightarrow \infty$ ). Unidades:  $\Theta_1$  en  $^{\circ}\text{C}$ ;  $h_{av}$  en  $\text{W}/\text{m}^2/^{\circ}\text{C}$ ;  $k_{s,av}$  en  $\text{W}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_{s,av}$  en  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $MRD$  en %.

El valor del número de Biot calculado corresponde a un proceso de transferencia de calor dominado por el mecanismo de conducción y convección. En este sentido, el proceso de calentamiento asistido con ultrasonido, fue simulado asumiendo una resistencia externa despreciable a la transferencia de calor (en otras palabras, un proceso estrictamente controlado por el mecanismo de conducción,  $h \rightarrow \infty$ ,  $Bi \rightarrow \infty$ ) y una fracción despreciable de la energía ultrasónica absorbida por la muestra (caso 2, línea azul, Figura 5.14). En este caso, una alta velocidad de calentamiento del producto es proporcionada por la suposición de que es un proceso estrictamente controlado por la conducción, sin embargo, aún no se puede explicar el comportamiento para la cinética de calentamiento experimental más rápida observado a la temperatura más baja (40°C,  $MRD = 11.3\%$ ). Por otro lado, esta tendencia se invierte para la temperatura más alta (50°C,  $MRD = 7.4\%$ ), donde la velocidad de calentamiento calculada es mayor que la experimental. Contreras *et al.* (2018) consideraron que la irradiación con ultrasonido afecta la velocidad de calentamiento al influir esta sobre la difusividad térmica del material y estimaron esta propiedad suponiendo una resistencia externa insignificante a la transferencia de calor mediante el uso de un modelo analítico. Los valores de difusividad térmica estimados por Contreras *et al.* (2018) fueron  $1.4(\pm 0.2) \times 10^{-7}$ ,  $1.4(\pm 0.1) \times 10^{-7}$  y  $1.1(\pm 0.1) \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s para una temperatura de 40, 45 y 50°C, respectivamente. En el presente estudio, los valores de difusividad térmica promedio fueron determinados a partir de las formulas composicionales de Choi & Okos (1986) estos se encontraron en un rango de  $1.21 \times 10^{-7}$  a  $1.22 \times 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, los cuales son similares a los reportados por Contreras *et al.* (2018).

El modelo de transferencia de calor propuesto se ajustó a los datos experimentales para estimar el término de fuente (es decir, la fracción de energía ultrasónica absorbida por el sólido), mientras el valor de  $h$  fue estimado a través de la ecuación de Nusselt (Ecuación 5.58) (caso 3, línea roja, Figura 5.14). La fracción estimada de la energía ultrasónica absorbida por el sólido se encontró en un rango de 0.008 a 50°C y 0.037 a 40°C (Tabla 5.7), es decir, el efecto del ultrasonido sobre el aumento de la temperatura del producto es mayor a la temperatura más baja. el valor de  $1-f$  se aproxima a la fracción de volumen de la muestra en el baño de ultrasonido ( $\approx 0.027$ ).

Las propiedades térmicas promedio de la muestra, el coeficiente de transferencia de calor y el número de Biot permanecieron prácticamente constantes durante la estimación de  $1-f$  (Tabla 5.7). La adición del término de fuente ultrasónica a la ecuación de conducción permitió una reproducción adecuada de la cinética de calentamiento del jamón curado (2.6%  $MRD$  7.7%) reduciendo la desviación inicial entre los datos experimentales y los calculados observada a la temperatura más baja.

### **5.3. Efecto del UAI sobre el tiempo de congelación, inicio de la nucleación y sus propiedades fisicoquímicas**

La congelación es una de las técnicas más utilizadas para la conservación a largo plazo de los productos alimenticios, con el propósito de conservar a sus propiedades nutricionales y características sensoriales iniciales. No obstante, los métodos de congelación como la congelación por inmersión, por chorro de aire, por contacto, entre otros, aún presentan desventajas como una baja eficiencia de congelación y un daño en la calidad final de los alimentos congelados. En este sentido, el uso de tecnologías que reduzcan los tiempos de procesamiento, además de preservar la calidad de los alimentos congelados, es de interés para la industria alimentaria. Entre estas tecnologías, la aplicación de las ondas ultrasónicas ha ganado especial atención debido a que el efecto de cavitación producido por el ultrasonido puede acelerar significativamente el proceso de congelación.

No obstante, a pesar del efecto positivo del ultrasonido sobre el proceso de congelación, éste también podría causar efectos negativos sobre la eficiencia de dicho proceso y por lo tanto, de la calidad final de los alimentos. Lo anterior podría ser debido a que, durante el colapso de las burbujas de cavitación se podrían producir efectos de sonoluminiscencia, la cual podría promover reacciones químicas no deseadas y causar de manera irreversible la degradación de algunos nutrientes. Por lo tanto, para contrarrestar estos efectos negativos es recomendable aplicar el ultrasonido durante tiempos cortos. Considerando todo lo anterior se planteo como objetivo del presente capítulo el evaluar el efecto del ultrasonido sobre el tiempo de congelación y el inicio de la nucleación, así como su influencia sobre las propiedades fisicoquímicas de diferentes matrices alimenticias. Los resultados se muestran a continuación.

#### **5.3.1. Tiempo de congelación**

El tiempo de congelación es una de las variables más importantes a controlar durante un proceso de congelación, el cual se encuentra en función de las características del producto a congelar y de las condiciones operativas del proceso. Por lo tanto, es importante contar con métodos de predicción del tiempo de congelación precisos para obtener un producto de calidad. En la presente sección, se realizó la predicción del tiempo de congelación y este fue comparado con el tiempo experimental obtenido para diferentes matrices alimenticias.

En el caso de la predicción del tiempo de congelación, en secciones anteriores, se determinó experimentalmente el valor del  $h$  a través de un modelo de transferencia de calor. En este sentido, se demostró que los coeficientes de transferencia de calor experimentales obtenidos de las geometrías de cobre, pueden emplearse para matrices alimenticias con geometrías similares, ya que la transferencia de calor por convección está controlada principalmente por el medio de inmersión. Por

lo tanto, para la predicción del tiempo de congelación se utilizó el valor de  $h$  estimado a partir de la correlación de  $Nu$  desarrollada en el presente trabajo (Ecuación 5.56), para un cilindro de papa y jicama (0.02 m de diámetro y 0.03 m de longitud) inmersos en una solución acuosa de  $\text{CaCl}_2$  (30 g/L) a  $-10^\circ\text{C}$ , con un flujo de  $4.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . En la Tabla 5.8 se muestran los factores y niveles evaluados experimentalmente en el presente capítulo.

Tabla 5.8. Factores y niveles evaluados

<b>Factor</b>	<b>Nivel</b>
Matriz	jicama, papa y betabel
Temperatura del medio de inmersión ( $^\circ\text{C}$ )	$-10^\circ\text{C}$
Flujo (Q), ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	$4.0 \times 10^{-5}$
Tiempo de aplicación del ultrasonido (s)	0, 5, 10, 15, 20 y 25
Potencia ultrasónica (P) (%)	0 y 100

Los resultados mostraron que el valor de  $Nu$  obtenido sin aplicación del ultrasonido fue de 16.2 ( $296.9 \text{ W/m}^2\text{C}$ ) y de 26 ( $476.9 \text{ W/m}^2\text{C}$ ) considerando una potencia ultrasónica del 100%. Por lo tanto, se observó que el valor de  $h$  en presencia de la irradiación ultrasónica aumentó alrededor del 40%, lo cual resulta en una mejora significativa de la transferencia de calor.

En la Tabla 5.9 se presentan los tiempos de congelación obtenidos para las diferentes etapas del proceso con y sin aplicación del ultrasonido sobre los cilindros de jicama y papa. Dichos tiempos fueron estimados a partir del valor del coeficiente obtenido y de las ecuaciones analíticas propuestas por Pham 1984 y Pham 1986 (Tabla 1.2). El cálculo del tiempo de congelación se realizó considerando que el ultrasonido es aplicado durante todo el proceso.

Tabla 5.9. Tiempos de congelación obtenidos a través una solución analítica en diferentes matrices alimenticias con y sin aplicación del ultrasonido.

Matriz	Tiempo de congelación (s)							
	Jicama				Papa			
	Sin ultrasonido		Con ultrasonido		Sin ultrasonido		Con ultrasonido	
Etapa	Pham (1984)	Pham (1986)	Pham (1984)	Pham (1986)	Pham (1984)	Pham (1986)	Pham (1984)	Pham (1986)
Enfriamiento	157	–	131	-	157	–	131	–
Cambio de fase	1038	–	854		607	–	607	–
Subenfriamiento	290	–	239		324	–	269	–
Total	1486	1232	1224	1014	1088	1304	1007	1084

Se puede observar que en el tiempo estimado para la muestra de jicama, hubo una reducción de aproximadamente del 20% del tiempo de congelación total cuando el ultrasonido es considerado respecto al tiempo calculado sin ultrasonido. En cuanto al tiempo de congelación estimado para el cilindro de papa, se observó una reducción de alrededor del 15% cuando existe irradiación ultrasónica. Por lo tanto, al aumentar el valor del coeficiente de transferencia de calor, el cual es un parámetro que puede afectar la velocidad de congelación, se puede esperar una reducción del tiempo de congelación no mayor al 20% cuando existe presencia del ultrasonido durante todo el proceso de congelación.

Por otro lado, se obtuvieron los tiempos de congelación experimentales cuando el ultrasonido fue aplicado durante 0 y 10 s una vez que la temperatura del centro geométrico de las muestras alcanzara los 0°C (Tabla 5.10).

Tabla 5.10. Tiempos de congelación experimentales obtenidos para cilindros de jicama y papa con y sin aplicación del UAI.

Etapa	Muestra			
	jicama		papa	
	0 s	10s	0s	10s
Enfriamiento (20 a 0°C)	145	140	175	185
Cambio de fase (0 a -5°C)	380	245	810	425
Subenfriamiento (-5 a -10°C)	400	490	100	285
Tiempo total (s)	925	875	1085	895

De acuerdo a la Tabla 5.10, se observa que los tiempos de congelación totales experimentalmente obtenidos para el cilindro de jicama con y sin aplicación del ultrasonido fueron de 875 y 925 s, respectivamente. Las muestras sometidas a irradiación ultrasónica mostraron una reducción del tiempo total de congelación de alrededor del 6%.

No obstante, en la etapa de cambio de fase, la reducción del tiempo fue más significativa observándose una reducción del alrededor del 35%, cuando se compara con el proceso no irradiado ultrasonicamente. En el caso de los cilindros de papa sometidos al ultrasonido la reducción fue de alrededor del 20%, en tanto que, para la etapa de cambio de fase, el tiempo en que esta ocurrió fue menor en comparación cuando no fue aplicado el ultrasonido, reduciendo el tiempo alrededor del 40%. De acuerdo al tiempo de congelación predictivo, cuando el UAI es aplicado durante todo el proceso de congelación, éste solo sería capaz de reducir el tiempo hasta un 20%, mientras que para el tiempo de congelación experimental puede existir una reducción similar (20%), pero con un menor tiempo de aplicación del UAI durante el proceso de congelación, lo que aumenta la eficiencia energética del sistema. Por lo tanto, se puede inferir, que la reducción del tiempo de congelación en las muestras, no fue debido a la intensificación del proceso de transferencia de calor que provoca el ultrasonido, sino a que el ultrasonido pudo desencadenar el inicio de la nucleación, por un efecto

independiente al fenómeno de transporte.

### 5.3.2. Influencia de la aplicación del ultrasonido sobre el proceso de nucleación

El análisis de la curva de congelación permite conocer los diferentes comportamientos y cambios de fase ocurridos durante el proceso de congelación, además de que sirve para la determinación de parámetros que son de importancia durante el proceso. Es por ello que a partir de las curvas de congelación se pueden conocer y determinar etapas como lo es la nucleación, la cual, junto con la cristalización, influyen significativamente sobre la eficiencia del proceso y por lo tanto sobre la calidad final del producto a congelar. Por ello, para poder llevar a cabo el análisis de la etapa de nucleación en un proceso de congelación asistido con ultrasonido, se construyeron experimentalmente curvas de congelación a distintos tiempos de aplicación ultrasónica para evaluar su efecto sobre dicha etapa. Para ello, se utilizó la metodología previamente descrita en el apartado 3.2.2 de Materiales y métodos.

Las Figuras 5.15 y 5.16 muestran las diferentes curvas de congelación de los cilindros de jicama y papa, respectivamente. Dichas curvas fueron divididas en tres etapas, las cuales comprendieron la Etapa de enfriamiento (20 a 0°C etapa I) etapa de cambio de fase (0 a -5° etapa II) y la etapa de subenfriamiento (-5 a -10°C etapa III). Para el caso de las muestras de jicama, los resultados evidenciaron que la aplicación del UAI a tiempos de 5 y 15 s no existió una reducción en el tiempo de congelación, por lo que el inicio de cambio de la fase de las muestras ocurrió de forma similar a la muestra control (no irradiada con UAI), por lo tanto, la aplicación del ultrasonido no fue lo suficientemente larga para inducir el inicio de la nucleación. No obstante, algunos autores (Chow *et al.*, 2003; Inada *et al.*, 2001) han encontrado que la aplicación con ultrasonido durante 5 s o menos puede ser suficiente para desencadenar el inicio de la nucleación en muestras líquidas, por lo que en muestras sólidas este periodo corto de aplicación del ultrasonido no es suficiente para inducir la nucleación. Para la aplicación del ultrasonido a 10 s se pudo observar que existió un anticipo del proceso de la etapa de cambio de fase y, por lo tanto, una reducción del tiempo de congelación respecto a la muestra control. El comportamiento anterior manifestó que la aplicación del ultrasonido fue suficiente para desencadenar el inicio de la nucleación, sin generar calor en la muestra, el cual pueda llegar a interrumpir dicho proceso, por lo que es recomendable que éste sea aplicado durante un corto tiempo. Por último, cuando el ultrasonido fue aplicado durante 20 s este tiempo ya no fue adecuado para la reducción del tiempo de congelación debido a que el calor producido por las ondas de ultrasonido prolongó la etapa de cambio de fase en comparación con la muestra control. Por lo que de acuerdo a los resultados obtenidos existe un tiempo óptimo de la aplicación del ultrasonido.

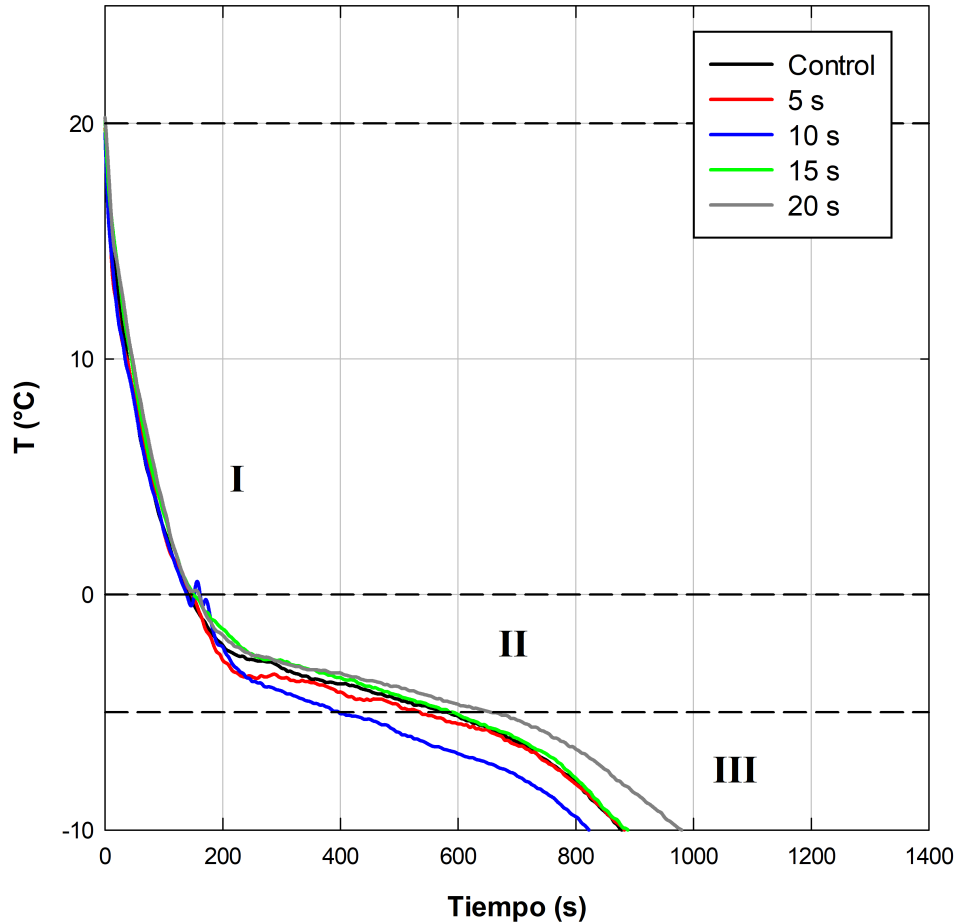


Figura 5.15. Efecto de diferentes tiempos de aplicación del UAI (5, 10, 15 y 20 s) sobre el tiempo de congelación de cilindros de jicama. Cada curva mostrada corresponde al promedio de tres replicas.

Las muestras de papa mostraron un comportamiento diferente a las muestras de jícama. Por un lado, la curva de la muestra control o no irradiada, presentó un alto grado de sobreenfriamiento teniendo como inicio de nucleación una temperatura de  $-6.7^{\circ}\text{C}$ , mientras que para las curvas de congelación obtenidas con la aplicación del ultrasonido la etapa de subreenfriamiento fue menor. Los resultados del presente trabajo fueron opuestos a lo observado por la teoría de Hickling (1965) la cual dice que la aplicación del ultrasonido provoca un alto grado de sobreenfriamiento debido al colapso de las burbujas de cavitación, ya que en los resultados obtenidos en este trabajo la cavitación producida por el ultrasonido provocó un aumento significativo de la temperatura local.

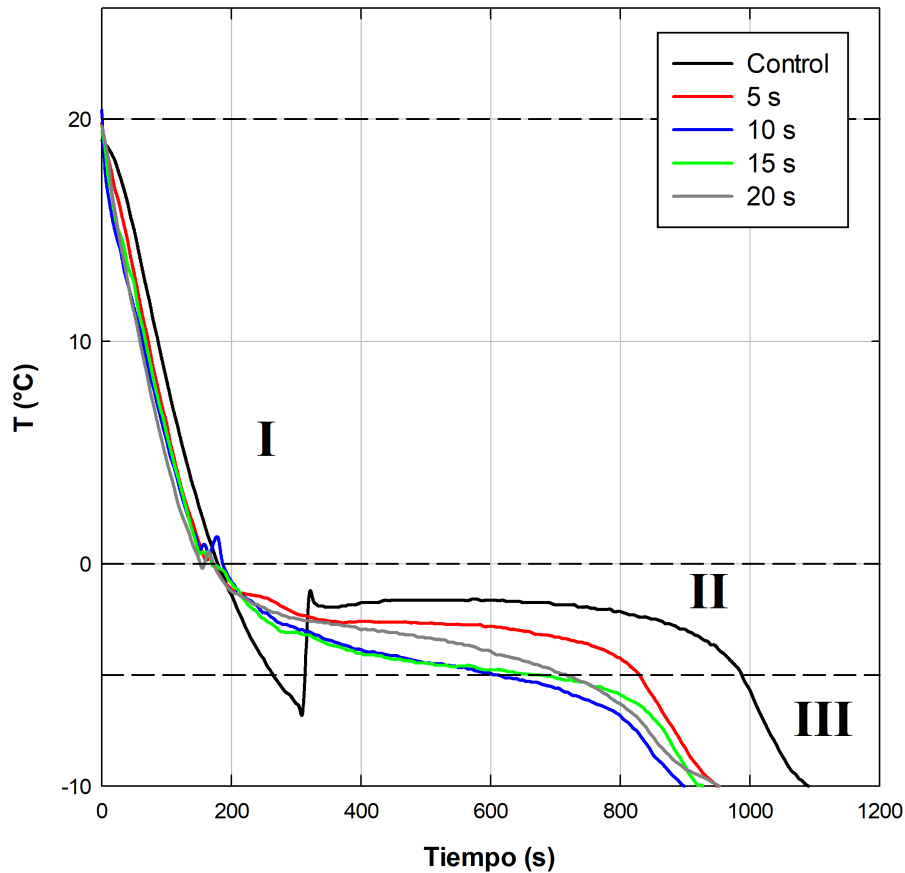


Figura 5.16. Efecto de diferentes tiempos de aplicación del UAI (5, 10, 15 y 20 s) sobre el tiempo de congelación de cilindros de papa. Cada curva corresponde al promedio de tres replicas.

Por lo tanto, se infiere que se llevó a cabo una intensificación del proceso de congelación y por lo tanto un anticipación de la etapa de nucleación, lo cual probablemente pudo ser debido a que las burbujas de cavitación generadas por el ultrasonido pueden actuar como núcleos para el crecimiento cristalino y el colapso violento de éstas pueden fragmentar los cristales de hielo existentes en tamaños más pequeños, lo cuales pueden actuar como núcleos para el crecimiento cristalino, promoviendo una adecuada nucleación del hielo (Figura 5.17).

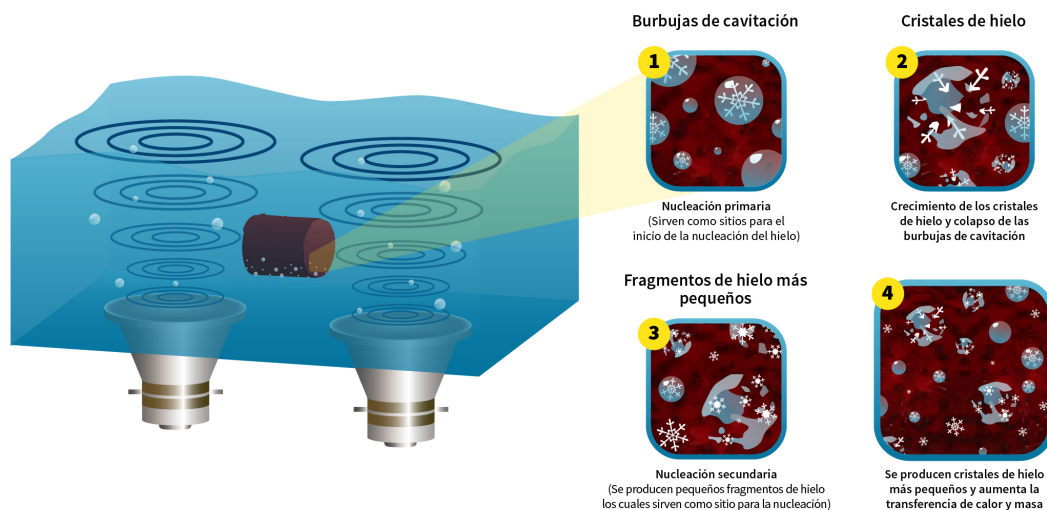


Figura 5.17. Posible mecanismo de nucleación del proceso de congelación por inmersión asistida con UAI de una matriz alimenticia.

Mason *et al.* (1996) observaron un comportamiento similar a lo reportado en el presente trabajo, ya que encontraron que la cavitación puede promover la nucleación heterogénea primaria al actuar como núcleos de hielo, y también la nucleación secundaria debido a la alta presión instantánea y la microturbulencia creadas por el colapso de las burbujas de cavitación. Zhang *et al.* (2001), encontraron que el cambio de fase del agua sobreenfriada a hielo inducido por el ultrasonido se debe principalmente a la cavitación, debido a que la probabilidad del cambio de fase inducido por el ultrasonido el cual aumenta a medida que aumenta el número total de núcleos de burbujas, lo cual es independiente al grado de sobreenfriamiento, ambas teorías son más adecuadas de acuerdo a los resultados obtenidos.

Resultados similares fueron reportados por Comandini *et al.* (2013) y Cheng *et al.* (2014) quienes encontraron que el ultrasonido redujo el tiempo total de congelación en muestras congeladas por inmersión de papa y fresa respectivamente, al reducir el grado de sobreenfriamiento, reduciendo así el tiempo de requerido para el inicio de la nucleación, sin embargo el ultrasonido aumentó el tiempo de transición de fase de ambos estudios. En contraste, Hu *et al.* (2013) demuestran que el ultrasonido puede reducir el tiempo de transición de fase (así como el tiempo de todas las demás etapas de congelación) en un estudio con muestras modelo.

### 5.3.3. Efecto de la aplicación del UAI sobre el color y textura

El color es un indicador importante y directo para evaluar la calidad visual de los alimentos. Afecta la apariencia, presentación y aceptabilidad de los mismos (Choi *et al.*, 2017). Durante el proceso de congelación y posterior descongelación las características sensoriales de los alimentos,

pueden ser afectas por lo cual es importante evaluar el grado de afectación que sufren, a través de parámetros como puede ser el color.

Se evaluaron los parámetros derivados del color como lo es el tono ( $h^\circ$ ) y croma ( $C^*$ ) (Tabla 5.11), así como las diferencias de color  $\Delta E^*$  (Figura 5.18) de matrices alimenticias descongeladas de jicama y papa, previamente sometidas a una congelación con ultrasonido.

Los valores de los parámetros derivados del color como lo es el tono ( $h^\circ$ ), el croma ( $C^*$ ) y las diferencias de color  $\Delta E^*$  de las matrices alimenticias descongeladas (jicama y papa) con aplicación del UAI se presentan en la Tabla 5.11 y en la Figura 5.18, éste parámetro cambio según el tiempo en que fue aplicado el UAI durante el proceso de congelación.

Tabla 5.11. Efecto de la aplicación del UAI sobre los parámetros de color (tono ( $h^\circ$ ) y croma ( $C^*$ )) y su comparación con la muestra fresca.

Matriz	Parámetro de color	Tiempo de aplicación del UAI (s)					Fresca
		0	5	10	15	20	
jicama	$h^\circ$	71.6	70.6	72.4	71.2	69.9	76.2
	$C^*$	8.22	7.36	9.59	8.60	7.32	10.35
Papa	$h^\circ$	82.7	82.1	85	81.3	83.2	87.4
	$C^*$	11.89	11.51	12.95	10.79	12.10	18.13

El  $h^\circ$  varía de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  y éste es utilizado como un indicador del cambio de color, si los valores de  $h^\circ$  son superiores a  $100^\circ$ , un incremento en este valor indica un aumento en el verdor; mientras que si los valores son inferiores a  $50^\circ$ , una disminución en este valor indica un aumento en el enrojecimiento. Cuando los valores de  $h^\circ$  están entre  $50$  y  $100^\circ$ , cualquier disminución en este rango indica un aumento en la amarillez. Como se muestra en la Tabla 5.11 el valor de  $h^\circ$  obtenido tanto para la jicama como para la papa se encontró en el rango de entre  $50$  y  $100^\circ$ , lo cual mostró que el amarillo es el color dominante.

Para todos los tratamientos y en ambas muestras el  $h^\circ$  disminuye en comparación con la muestra fresca, por lo que, estas aumentaron su amarillez a consecuencia de los tratamientos. Así, las muestras obtenidas a los 10 s de irradiación, fueron las que tuvieron una menor diferencia con respecto al  $h^\circ$  de las muestras frescas. En cuanto al  $C^*$ , las muestras sometidas a todos los tiempos de tratamiento en ambas matrices obtuvieron valores menores con respecto a las muestras frescas, lo que significa que éstas presentaron un tono ( $h^\circ$ ) amarillento más pálido.

En el caso de la jicama las muestras que presentaron un menor valor del  $C^*$  fueron cuando el ultrasonido se aplicó durante 5 y 20 s, no obstante, a un tiempo de aplicación de 10 s el valor de  $C^*$  fue de 9.59 el cual fue muy similar al obtenido a la muestra fresca (10.35) y mayor al de muestra control. Por otro lado, en el caso de la papa los valores de  $C^*$  el valor más bajo se obtuvo cuando

el ultrasonido se aplicó durante 15 s (10.79), incluso siendo más bajo que la muestra control; el mayor valor de  $C^*$  fue de 12.95 el cual fue obtenido cuando el ultrasonido fue aplicado durante 10 s, no obstante, en este caso si se observó una mayor diferencia con respecto a la muestra fresca, en comparación con las muestra de jícama.

Para evaluar los cambios en las diferencias totales de color, este se clasifica en tres grupos, si  $\Delta E^* > 3$ , la diferencia es muy distinta, si  $1.5 < \Delta E^* < 3$ , la diferencia es distinta, finalmente si la  $\Delta E^* < 1.5$ , la diferencia es imperceptible (Nowak *et al.*, 2019; Tiwari *et al.*, 2008). El valor del  $\Delta E^*$  para el caso de la jícama (Figura 5.18A) el cual fue calculado con respecto a la muestra fresca, para los tiempos de aplicación de 5 y 20 s el valor fue de alrededor de 7, siendo estos tratamientos en cuales se mostró la mayor diferencia de color con respecto a la muestra fresca. Los valores de  $\Delta E^*$  de 3.4 y 2, a un tiempo de aplicación de 10 y 15 s, respectivamente. Los valores más altos obtenidos de  $\Delta E^*$  para las muestras de papa (Figura 5.18B) en donde fue aplicado el ultrasonido durante 15 y 20 s, fueron aquellos en donde fue aplicado el ultrasonido en comparación a la muestra control. A los 5 s el valor de  $\Delta E^*$  fue similar al obtenido sin aplicación del ultrasonido (aproximadamente de 3), no obstante, a los 10 s obtuvo la mínima diferencia de color con respecto a la muestra fresca (1.9). Una menor diferencia de color fue obtenida a los 10 s de irradiación ultrasónica tanto para jícama como para papa.

Cuando se analizaron los resultados, se pudo observar que existieron diferencias de color entre las muestras sometidas a ultrasonido y las muestras congeladas en ausencia del ultrasonido. Además, el comportamiento de las diferencias de color entre ambas muestras (jícama y papa) no fue similar, observándose, que las muestras de jícama tuvieron mayores diferencias. Lo anterior se puede inferir a que la naturaleza de las muestras se vio afectada por la presencia de irradiación acústica y por el efecto del proceso de congelación, es decir, por la presencia de la formación de los cristales. La papa presenta una composición química (Tabla 4.1) en la que la fracción de agua predomina ( $x_{H_2O}=0.82$ ), seguida de sólidos totales ( $x_{st}=0.18$ ) y carbohidratos ( $x_{CHO}= 0.15$ ), mientras que, para la jícama, su composición es abundante en agua ( $x_{H_2O}=0.86$ ), por lo tanto, se podría concluir que al ser una matriz más rica en agua, la jícama presenta los cambios más importantes en las diferencias de color ya que dicha fracción acuosa sufre el cambio de fase y esto podría estar afectando a la estructura celular lo que generó los cambios en el color tras su descongelación.

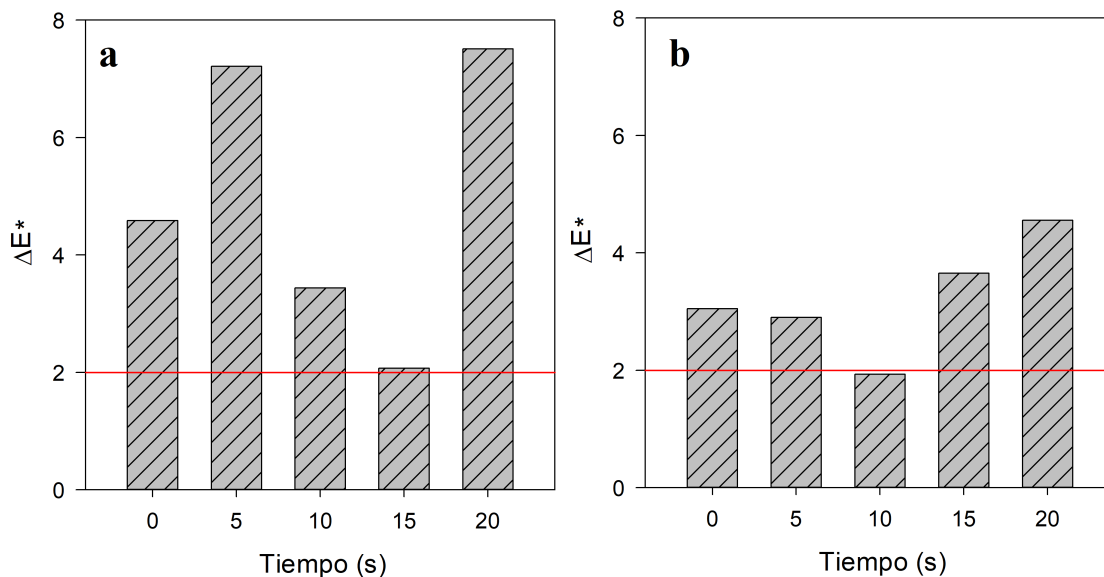


Figura 5.18. Valores de la diferencias de color  $\Delta E^*$  (Ecuación 4.4) obtenidos para la jicama (a) y papa (b) con aplicación del UAI

Otro de los parámetros físicos más relevantes es la textura, la cual puede a través de la firmeza de la muestra. La firmeza es un parámetro de calidad crítico de las frutas y vegetales para su aceptabilidad. Por lo que se evaluó con la metodología descrita en apartado 3.2.4. Los valores de firmeza de los cilindros de papa y jicama bajo diferentes tiempos de aplicación del ultrasonido se muestran en la Figura 5.19. La firmeza se vio afectada por la velocidad de congelación, la cuál esta en función del tiempo en que se aplicó el ultrasonido. Una rápida velocidad de congelación puede generar pequeños cristales de hielo, mientras que una baja velocidad puede producir la formación de grandes cristales de hielo y como consecuencia, daños en la estructura física, es decir, en la firmeza y por lo tanto, un deterioro en la calidad del producto final (Awad *et al.*, 2012), lo cual puede estar relacionado con lo obtenido en el presente trabajo.

En la Figura 5.19A se puede observar que la firmeza de los cilindros de jicama a los 5 s de aplicación del ultrasonido disminuyo significativamente ( $p < 0.05$ ). Una mayor firmeza (21.5 N) fue observada a los 10, 15 y 20 s de aplicación, por lo que no se observaron diferencias significativas entre estos tiempos. Por último todos los tiempos de aplicación excepto a los 5 s, la firmeza fue significativamente mayor que en comparación con la muestra control (18.9 N). El valor de firmeza de la muestra fresca fue de  $29.6 \pm 0.6$  N, por lo que el daño en la firmeza causado por la naturaleza del proceso de congelación fue menor cuando fue aplicado el ultrasonido.

En los cilindros de papa (Figura 5.19B) no se encontraron diferencias de la firmeza entre la muestra control y las las irradiadas a 5 y 20 s. Un menor daño de la firmeza en la muestra de papa se obtuvo a los 10 y 15 s de 24.24 y 22.49, respectivamente. El valor de la firmeza de la muestra fresca fue de  $29.70 \pm 0.6$  N, nuevamente las muestras en donde fue aplicado el ultrasonido

provocaron un menor daño en la estructura celular de la papa.

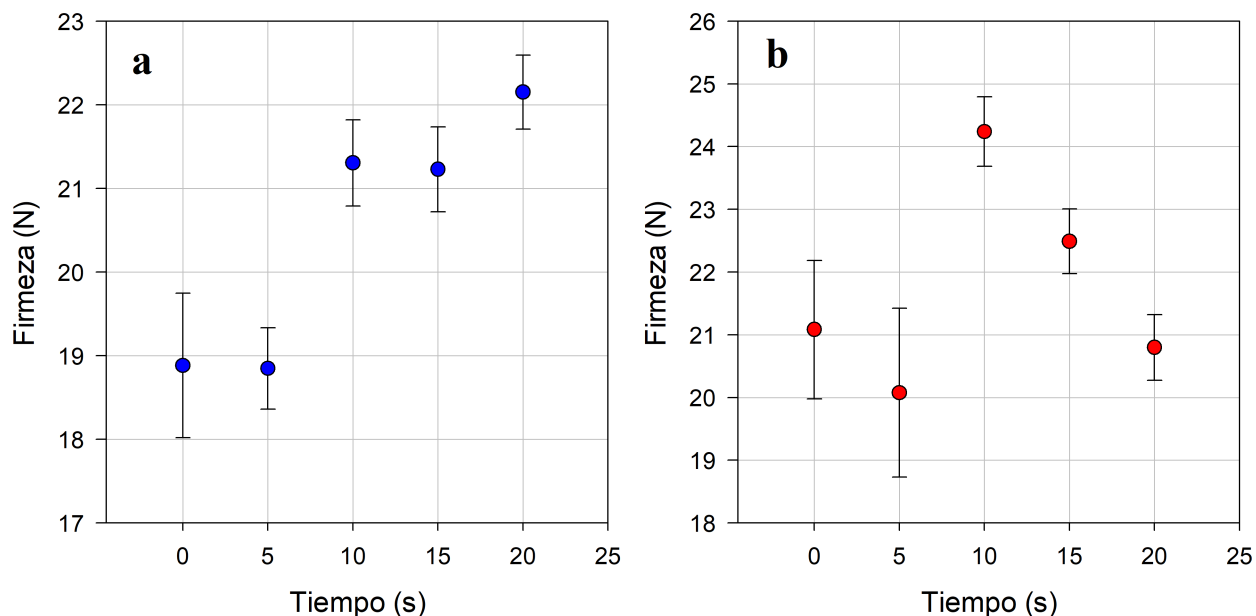


Figura 5.19. Efecto de diferentes tiempos de aplicación del UAI sobre la firmeza de la jicama (a) y papa (b) descongelada. Medias  $\pm$  intervalos LSD ( $p < 0.05$ ).

Resultados similares fueron reportados por Xin *et al.* (2014b) quienes encontraron que la aplicación del ultrasonido mejoró significativamente la firmeza del brócoli y rábano congelado con ultrasonido en comparación con los obtenidos sin aplicación del ultrasonido. Xu *et al.* (2015) y Tu *et al.* (2015) mostraron que el tratamiento acústico presentó una alta velocidad de congelación en muestras de rábano y raíz de loto en comparación cuando éste no fue aplicado, por lo tanto, las muestras en donde la irradiación está presente muestran una mayor firmeza.

### 5.3.4. Influencia de la aplicación del UAI sobre el CFT y su CA

La aplicación del UAI en la congelación por inmersión de diferentes alimentos, ha sido estudiada durante los últimos años, pero la mayoría de los estudios existentes evalúan el efecto del ultrasonido sobre las propiedades físicas (color, firmeza, textura, microestructura) de las matrices alimenticias y son muy pocos los trabajos que evalúan su efecto sobre las propiedades químicas, como puede ser el perfil antioxidante. Se sabe que el ultrasonido puede desarrollar un efecto químico de sonoluminiscencia, el cual, al momento de ser utilizado en el área de la conservación de los alimentos, éste podría limitar su aplicación por efecto de cambios químicos en las matrices conservadas por esta tecnología, haciendo que se pierda la inercia química de los mismos, por lo cual es un área de interés para seguir desarrollando. En esta etapa del trabajo, se evaluó la influencia de la aplicación

del UAI sobre las propiedades químicas de matrices alimenticias previo al proceso de congelación y posterior descongelación, mediante el estudio de la capacidad antioxidante de compuestos fenólicos contenidos en los alimentos de estudio. Para poder estudiar los posibles cambios químicos que pudieran existir por la presencia de la irradiación ultrasónica, se utilizaron como objeto de estudio muestras de cilindro de betabel, el cual posee un alto poder antioxidante. Para ello se cuantificó su contenido fenólico total y la capacidad antioxidante de dichos fenoles durante procesos de congelación asistida o no, con ultrasonidos de alta intensidad, por lo que se empleó la metodología previamente descrita en el/los apartado/3.4.3 y 3.4.4 de la sección de Materiales y métodos. Los resultados obtenidos de la cuantificación de compuestos fenólicos totales en los cilindros de betabel de las muestras frescas y las muestras sometidas a la congelación asistida o no con UAI se muestran en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12. Contenido fenólico total (CFT) y capacidad antioxidante (CA) de cilindros de betabel descongelado.

Tratamiento	CFT	CA (ABTS)	CA(DPPH)	CA(FRAP)
	(mg GAE/100 g m.f)	(mg TROLOX/100 g m.f)		
Fresca	60.30±1.9 <sup>a</sup>	96.03±1.9 <sup>a</sup>	109.25±5.6 <sup>a</sup>	481.05±27.8 <sup>a</sup>
0-US	46.73±2.2 <sup>b</sup>	37.60±3.9 <sup>f</sup>	77.95±2.2 <sup>c</sup>	344.50±4.4 <sup>c</sup>
5-US	29.95±1.1 <sup>d</sup>	51.05±0.4 <sup>e</sup>	68.75±6.7 <sup>d</sup>	323.60±11.3 <sup>c</sup>
10-US	42.30±5.8 <sup>b<sup>c</sup></sup>	61.15±2.9 <sup>d</sup>	81.18±6.8 <sup>c</sup>	432.10±20.2 <sup>b</sup>
15-US	60.47±2.3 <sup>a</sup>	81.83±3.4 <sup>b</sup>	101.28±2.1 <sup>b</sup>	487.53±30.4 <sup>a</sup>
20-US	37.20±1.6 <sup>c</sup>	71.13±2.5 <sup>c</sup>	81.45±5.9 <sup>c</sup>	353.60±21.8 <sup>c</sup>
25-US	27.40±0.7 <sup>d</sup>	28.45±0.7 <sup>g</sup>	64.80±2.7 <sup>d</sup>	279.15±3.2 <sup>d</sup>

Los resultados se muestran como la media (n = 3) ± desviación estándar. Los valores con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey (p <0.05).

A partir de los valores del contenido fenólico total se pudo observar que existieron diferencias significativas (p<0.05) entre las muestras frescas y las muestras sometidas a congelación con o sin presencia de irradiación acústica, excepto para las muestras que fueron sometidas a 15 s de aplicación del UAI. La cantidad más alta del CFT fue de 60.5±2.3 mg GAE/100 g m.f. para los 15 s de aplicación del UAI, mientras que la más baja fue de 27.4±0.7 mg GAE/100 g m.f. cuando el ultrasonido fue aplicado 25 s, por lo tanto, esto manifestó que una aplicación prolongada del ultrasonido disminuye el CFT. Este comportamiento puede ser relacionado a que existe un efecto del daño que generan los cristales de hielo en la estructura celular del alimento y además a que puede comenzar a existir la generación de radicales hidroxilos generados por el efecto de cavitación que produce el ultrasonido, los cuales reaccionan con las sustancias fenólicas produciendo intermedios oxidantes y disminuyendo así el CFT (Kidak & Ince, 2006). Por lo tanto, los resultados obtenidos en el presente trabajo fueron similares a aquellos reportados por Zhu *et al.* (2020), quienes evaluaron el efecto de ultrasonido de multi-frecuencia durante la congelación de papas y su efecto sobre el CFT

en muestras descongeladas, quienes encontraron que la aplicación del ultrasonido podría generar radicales hidroxilos, lo cual podría disminuir el valor nutricional del alimento.

Sin embargo, para una mejor comprensión del comportamiento de los compuestos fenólicos presentes en las muestras, es necesario evaluar no solo su cantidad, sino su capacidad de perfil antioxidante. De esta manera, la evaluación de la capacidad antioxidante fue estudiada y debido a la complejidad de la composición antioxidante de los vegetales y de compuestos no individuales estos deben estudiarse por las posibles interacciones sinérgicas o antagónicas que pueden existir entre los compuestos antioxidantes (Murcia *et al.*, 2009).

Por lo tanto, para lograr una mejor evaluación de la CA, se utilizaron tres métodos para su determinación: ABTS, DPPH y FRAP, ya que cada método se basa en un sistema químico y/o reacción diferente, por lo cual podrían esperarse resultados diferentes de CA dependiendo del método utilizado (Karadag *et al.*, 2009).

Así, los resultados obtenidos de la capacidad antioxidante durante los procesos de congelación a diferentes condiciones se muestran en la Tabla 5.12. Los valores iniciales de la CA de acuerdo a los ensayos ABTS, DPPH y FRAP en muestras frescas fueron de  $96.0 \pm 1.9$ ,  $109.2 \pm 5.6$  y  $481.1 \pm 27.8$  mg TROLOX/100 g m.f, respectivamente. Para los tres ensayos evaluados se observaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre las muestras frescas y las congeladas con los diferentes tiempos de aplicación del UAI. Por otro lado, la mayor CA se obtuvo a los 15 s de aplicación del ultrasonido obteniendo valores de  $81.8 \pm 3.4$ ,  $101.3 \pm 2.1$  y  $487.5 \pm 30.4$  mg TROLOX/100 g m.f, para el ABTS, DPPH y FRAP, respectivamente. Además la CA evaluada con el ensayo FRAP a los 15 s de aplicación del ultrasonido no mostró diferencias significativas con las muestras frescas. No obstante, se observó que aun tiempo mayor a 15 s de aplicación del ultrasonido, la CA disminuyó significativamente para los tres métodos utilizados.

En la Figura 5.20 se puede observar la correlación que existe entre el CFT del betabel y su CA evaluada con los ensayos ABTS (Figura 5.20A), DPPH (Figura 5.20B) y FRAP (Figura 5.20C). Para los tres métodos evaluados se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson significativo ( $p < 0.05$ ). En el caso de la CA evaluada con DPPH y FRAP se observó una clara dependencia con el CFT obteniendo una  $r = 0.94$  y  $0.87$ , respectivamente. Por otro lado, en el caso de la CA evaluada con ABTS se observó una baja correlación con el CFT, obteniendo una  $r = 0.63$ .

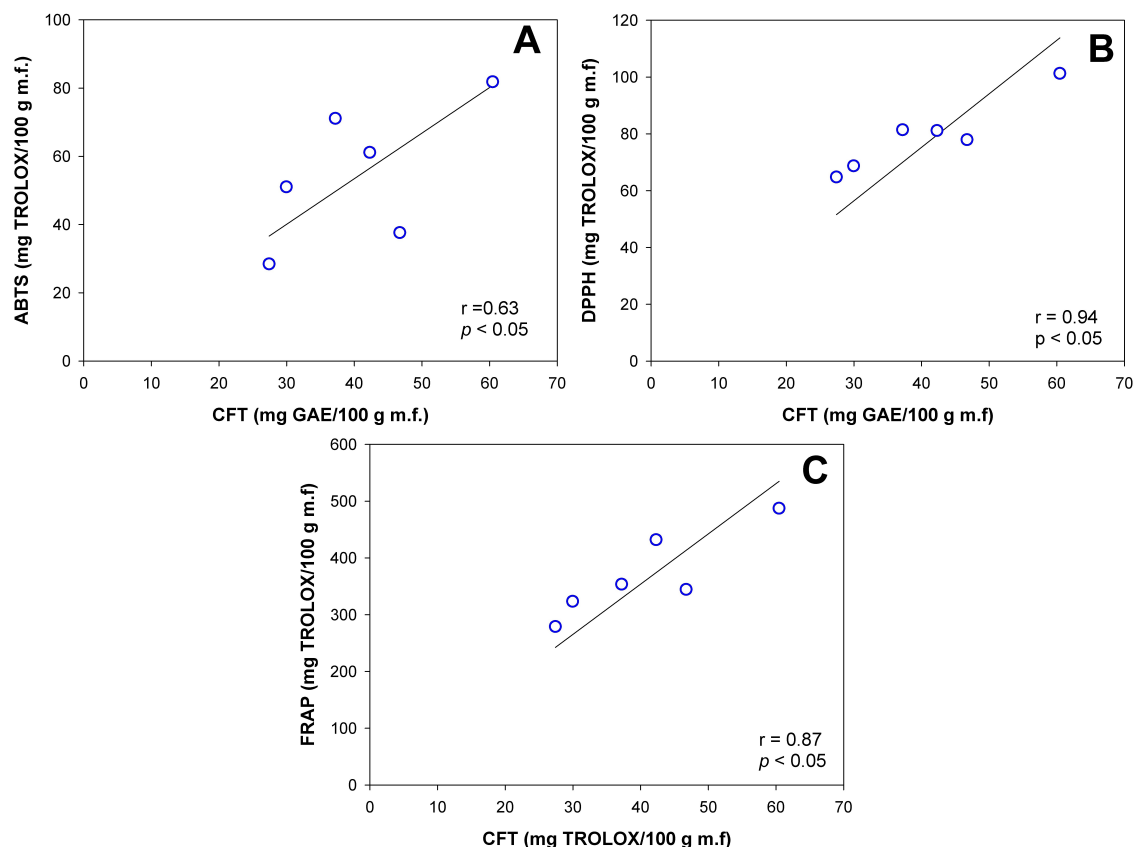


Figura 5.20. Correlación (*Pearson*) entre el CFT y su CA evaluada con ABTS (A), DPPH (B) y FRAP (C), en muestras de betabel congeladas con y sin UAI.

Aunque los tres métodos miden la CA, se observaron diferencias entre la dependencia de la CA respecto al CFT. Esto podría deberse a que el método ABTS y DPPH, miden la capacidad de un antioxidante para eliminar los radicales libres mediante la donación de hidrógeno para formar compuestos estables. Por un lado, debido a que el radical ABTS puede solubilizarse tanto en medios acuosos como orgánicos es capaz de medir la CA de compuestos de naturaleza hidrofílica y lipofílica. Por otro lado, el radical DPPH solo puede disolverse en medios orgánicos (especialmente en medios alcohólicos), no en medios acuosos lo cual es una limitación importante al interpretar el papel de los antioxidantes hidrófilos. En contraste, el ensayo FRAP mide la capacidad de un antioxidante para transferir un electrón para reducir el hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) a hierro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), sin embargo, no todos los reductores que pueden reducir el  $\text{Fe}^{3+}$  son antioxidantes, cualquier sustancia donante de electrones, incluso sin propiedades antioxidantes pueden contribuir al valor del FRAP y sobreestimar el valor de éste (Arnao, 2000; Gülcin, 2012; Karadag *et al.*, 2009).

En conclusión, aunque la CA de los cilindros de betabel difiere entre los ensayos utilizados, se pudo observar una alta correlación entre los CFT y la CA evaluada con DPPH, lo que nos indica que en las muestras evaluadas de betabel predominan los compuestos fenólicos de naturaleza

lipofílica, así como también se pudo observar que los CFT tienen un potencial reductor. En cuanto a la correlación entre el CFT y la CA evaluada con ABTS, es posible que CA no este relacionada con el CFT, sino más bien se encuentra relacionada con alguno compuesto fenólico específico.

En general se puede concluir que un tiempo prolongado de aplicación del UAI, puede reducir el CFT debido a la generación de radicales hidroxilo generados por el efecto de cavitación que produce el ultrasonido, los cuales reaccionan con las sustancias fenólicas produciendo intermedios oxidantes y disminuyendo así el CFT. Asimismo, se encontró una alta correlación entre el CFT y su CA, evaluada con los métodos DPPH y FRAP, en cuanto a la evaluada con ABTS es posible que la CA no este relacionada con el CFT, sino más bien se encuentra relacionada con alguno compuesto fenólico específico.

# DISCUSIONES GENERALES

A partir de los resultados obtenidos en la presente Tesis Doctoral se observó que la aplicación del Ultrasonido de Alta Intensidad (UAI), tanto en los procesos de enfriamiento y congelación, tuvo efectos significativos ( $p < 0.05$ ) en la intensificación de ambos procesos. Dichos efectos se vieron influenciados, por las propiedades termo-físicas del medio de inmersión y las variables del proceso (flujo, temperatura, potencia ultrasónica). Además, la aplicación del ultrasonido afectó las propiedades físico-químicas de las matrices alimenticias tratadas y, por lo tanto, la calidad del producto final.

No obstante, en procesos de enfriamiento y/o congelación asistidos con UAI es importante no solo tomar en cuenta las propiedades termo-físicas del medio de inmersión y las variables del proceso, sino una evaluación previa de la distribución de la energía del campo acústico puede contribuir a obtener una mayor eficiencia del proceso. Para ello, se determinó el valor de la intensidad ultrasónica ( $IU$ ), en distintas posiciones y distancias del área de transducción (25, 40 y 55 mm) dentro del baño de ultrasonido. Se encontró que, para una sola posición, a medida que aumenta la altura por encima del área de transducción el valor de la  $IU$  disminuyó significativamente ( $p < 0.05$ ) y, por lo tanto, su eficiencia de cavitación también. Para la posición 1 y 3, los valores más altos de  $IU$ , se obtuvieron para la distancia más cercana (25 mm) a el área de transducción, con valores de  $2755.4 \pm 97.4$  y  $2755.4 \pm 54.0$  W/m<sup>2</sup>, respectivamente. Para la posición 2, no se encontraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) de la  $IU$  entre la distancia de 25 y 40 mm. En este caso, se infirió que estas posiciones están en el centro del baño y el efecto individual de los transductores se solapan debido a los fenómenos mecánicos acústicos (blindaje, desacoplamiento y la coalescencia de las burbujas), lo que da como resultado un aumento de la actividad cavitacional, pero una disminución de su intensidad.

El efecto de la distribución del campo acústico sobre el enfriamiento de una esfera de cobre estacionaria sumergida en un baño ultrasónico refrigerado (0°C) fue evaluado en las mismas posiciones y alturas en las que se evaluó previamente la  $IU$ , obteniendo curvas de enfriamiento para cada posición. Cuando la esfera de cobre no fue irradiada con ultrasonido se requirieron 100 s de tiempo para enfriarla, mientras que la irradiación ultrasónica en cualquier posición del baño disminuyó significativamente ( $p < 0.05$ ) el tiempo de enfriamiento, y los tiempos de enfriamiento más bajos se obtuvieron cuando la esfera estuvo a una altura de 25 mm para todas las posiciones, obteniendo valores por debajo de los 59 segundos. Las profundidades de 40 y 55 mm alcanzaron tiempos de enfriamiento de 64 a 84 segundos, por lo tanto, la cantidad de calor transferido de la esfera al medio de enfriamiento fue mayor que la cantidad de calor generado por la acción de los ultrasonidos en la superficie de la esfera. A partir de las curvas de enfriamiento obtenidas se determinó el valor del

coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) a través de una solución analítica. De forma general los valores obtenidos de  $h$  fueron significativamente superiores, a los obtenidos sin aplicación del UAI, obteniendo una mejora de la transferencia de calor en un rango de 39.1 a 152.6%. También se encontró que el valor de  $h$  disminuyó cuando aumentó la distancia por encima del área de transducción. Así, a una distancia de 25 mm del área de traducción de fueron obtenidos los más altos valores de  $h$  para todas las posiciones. Además, cuando se compararon las posiciones, el valor más alto de  $h$  (1137.0 (1095.4/1178.7)  $W/m^2\text{°C}$ ) correspondió a la posición 2. Por último, una vez determinados la IU y el  $h$  en diferentes posiciones dentro del baño de ultrasonido, y con el propósito de una mayor comprensión de la distribución del campo acústico sobre la transferencia de calor asistida con UAI, ambos parámetros fueron relacionados y se encontró que existió una correlación positiva y significativa ( $r=0.92$ ) entre ellos; a una mayor IU una mayor velocidad de transferencia de calor. Por lo tanto, el conocer la distribución de la actividad cavitacional, proporciona datos fundamentales para diseñar procesos de transferencia de calor asistidos con ultrasonido más efectivos. Una mayor evaluación de puntos experimentales dentro de un baño de ultrasonido, así como con diferentes arreglos en los transductores, debe de realizarse para una escalado eficaz de equipos de ultrasonido de nivel laboratorio a escala industrial. Así como la utilización de otras técnicas para la evaluación del campo acústico (como las basadas en reacciones químicas).

Hasta el momento, se ha demostrado que la transferencia de calor puede mejorar considerablemente en presencia de un campo acústico, debido a esto, el UAI es uno de los métodos más utilizados para intensificar el proceso de transferencia de calor por convección. Por lo tanto, es importante investigar más a fondo el posible rendimiento para una mayor eficiencia del proceso (como se planteó en la primera sección de resultados), así como desarrollar métodos de predicción del  $h$  bajo irradiación ultrasónica. Como es bien sabido la determinación del  $h$  es de suma importancia para el control y diseño de equipos de proceso, sujetos a calentamiento y/o enfriamiento. Para ello, en la segunda sección de resultados del presente trabajo se realizó un análisis del proceso de calentamiento/enfriamiento por convección asistido por ultrasonido, dentro de este apartado se desarrolló y aplicó una ecuación de Nusselt ( $Nu$ ). Para la determinación del  $h$  existen diversas herramientas matemáticas como las correlaciones empíricas, en las cuales se cuantifica la influencia de las propiedades termo-físicas del fluido, de la superficie y del flujo cuando se produce transferencia de calor por convección. En un proceso de transferencia de calor asistido con UAI, la potencia y frecuencia ultrasónica deberían también ser consideradas. Sin embargo, los modelos o correlaciones existentes para predecir la mejora de la transferencia de calor en presencia del ultrasonido son muy limitados. Por lo cual, se realizaron 405 experimentos (cinéticas de enfriamiento y/o calentamiento) para generar una base de datos que permitirá evaluar el efecto de la temperatura, velocidad del flujo y potencia ultrasónica sobre el proceso de transferencia de calor. Para ello, se propuso un modelo de transferencia de calor por convección como proceso de entrada-respuesta. El

modelo considera que el sistema está sometido a una irradiación ultrasónica, dividida entre la fase fluida y sólida. A partir del modelo propuesto, el valor de los  $h$  se ajustó asumiendo una cantidad insignificante de energía ultrasónica absorbida por las muestras de cobre, así como también una resistencia interna despreciable a la transferencia de calor. El valor de los  $h$  se encontró en un rango de 368.6-1887 ( $14.4 \leq Nu \leq 89.5$ ), 562.1-2508.5 ( $22.2 \leq Nu \leq 98.7$ ) y 409.0-1386.8 ( $16.4 \leq Nu \leq 107.1$ )  $W/m^2\text{°C}$  para los diferentes niveles de potencia de ultrasónica utilizada (0, 30 y 100%, respectivamente). La relación de las contribuciones del mecanismo de convección e irradiación del ultrasonido sobre el calentamiento de la muestra, indican de forma general que el mecanismo de convección contribuye entre el 87 y el 98 % al aumento de temperatura ( $h=420 W/m^2\text{°C}$ , valor más bajo obtenido con ultrasonido), en el caso de la contribución más baja del mecanismo de convección, ésta ocurrió cuando se utilizó el 100 % de potencia ultrasónica y la diferencia más baja de temperatura entre el sólido y fluido ( $5\text{°C}$ ). La contribución del mecanismo de conducción en la estimación del  $h$  es de aproximadamente 1.5%, por lo cual no fue considerada. Por lo tanto, suponer como despreciable la cantidad de energía ultrasónica absorbida por el sólido fue adecuada.

Para el desarrollo de la correlación de  $Nu$ , se propuso un número de Nusselt aparente ( $Nu_{app}$ ) para un proceso asistido con ultrasonido, el cual se conformó como la suma de las contribuciones de los efectos de la convección forzada ( $Nu$ ) y la cavitación ( $Nu_{US}$ ), la cual afecta la turbulencia del flujo de un fluido que rodea a un sólido mejorando el valor del número de  $Re$  y por lo tanto, aumentando el valor de número de  $Nu$ . Los valores de  $h$  obtenidos cuando el ultrasonido fue aplicado a un 30 % de potencia ultrasónica mostraron un aumento significativo de  $h$  ( $h \geq 1000 W/m^2\text{°C}$ ) respecto a los obtenidos sin irradiación ultrasónica. A una potencia ultrasónica del 100 % y un número de  $Re > 100$  el efecto del ultrasonido es insignificante sobre la transferencia de calor. Por lo tanto, la aplicación del ultrasonido a una alta potencia y en combinación con un alto flujo no mejorara la transferencia de calor en comparación con un proceso no irradiado. De acuerdo con los resultados anteriores, la correlación de  $Nu$  propuesta solo se ajustó con los datos experimentales de las cinéticas realizadas a un 0 y 30 % de potencia ultrasónica. La capacidad de predicción de la correlación propuesta se probó con cinéticas de enfriamiento obtenidas experimentalmente de una solución acuosa de  $CaCl_2$  (30 g/L) y una solución de etilenglicol-agua (1: 1 V/V), y se comparó como la correlación desarrollada por Kiani *et al.* (2013). La correlación de  $Nu$  propuesta y la desarrollada por Kiani *et al.* (2013) presentaron una reproducción adecuada de los datos, con un rango MRD de 18 a 24 %.

Por último, se estudió una aplicación del modelo de transferencia de calor en un proceso de calentamiento asistido con ultrasonido a tiempos cortos y temperaturas moderadas de jamón curado. Para ello, las cinéticas de calentamiento experimentales del jamón curado fueron obtenidas a partir de la literatura (Contreras *et al.* 2018). El calentamiento del jamón curado se modeló utilizando una ecuación de conducción en estado no estacionario, bajo las siguientes consideraciones. En primera lugar se consideró el valor del coeficiente de transferencia de calor (378 a 392  $W/m^2\text{°C}$ ) obteni-

do a través de la correlación de  $Nu$  desarrollada en el presente trabajo y se asumió que la energía ultrasónica absorbida por la muestra era despreciable. En segundo lugar, de acuerdo con el valor de  $h$  y de la conductividad térmica del jamón curado (0.416 a 0.420 W/m°C), el valor del número de Biot (9.10 a 9.33) obtenido corresponde a un proceso de transferencia de calor dominado por el mecanismo de conducción y convección, por lo tanto, las cinéticas de calentamiento fueron simuladas asumiendo una resistencia externa despreciable a la transferencia de calor ( $h \rightarrow \infty$ ,  $Bi \rightarrow \infty$ ) y una fracción despreciable de la energía ultrasónica absorbida por la muestra. En tercer lugar, el modelo de transferencia propuesto se ajustó a los datos experimentales para estimar la energía ultrasónica absorbida por la muestra ( $1-f$ ), para ello, el valor de  $h$  fue estimado a través de la correlación de  $Nu$  propuesta. En el primer caso se observó que la simulación de las cinéticas de calentamiento fue más lenta que las experimentales obteniendo valores de MRD de 8.4 a 20%. En el segundo caso, se obtuvo una alta velocidad de calentamiento debido a que se consideró que es un proceso estrictamente controlado por el mecanismo de conducción. Sin embargo, la velocidad de calentamiento calculada es mayor que la experimental obteniendo valor de MRD de 7.4 a 11.3%. En el tercer caso, la fracción estimada de la energía ultrasónica absorbida por el sólido se encontró en un rango de 0.008 a 50°C y 0.037 a 40°C, es decir, el efecto del ultrasonido sobre el aumento de la temperatura del producto es mayor a la temperatura más baja (las propiedades térmicas promedio de la muestra, el  $h$  y el número de  $Bi$  permanecieron constantes durante la estimación de  $(1-f)$ ). La adición del término de fuente ultrasónica a la ecuación de conducción permitió una reproducción adecuada de la cinética de calentamiento del jamón curado (2.6% MRD 7.7%).

El uso de la correlación de  $Nu$  propuesta, ayudó a obtener un modelo de transferencia de calor que predijera de una forma más adecuada las cinéticas de calentamiento de jamón curado, por lo cual es recomendable seguir desarrollando herramientas matemáticas como lo son las correlaciones empíricas, que consideren el efecto del ultrasonido sobre el proceso de transferencia de calor, considerando otros parámetros ultrasónicos como la frecuencia.

Finalmente, en la tercera sección del apartado de resultados de la presente tesis, se realizó una evaluación del efecto del UAI sobre el tiempo de congelación, inicio de la nucleación y propiedades fisico-químicas de diferentes matrices alimenticias. Como es bien sabido el tiempo de congelación es una de las variables más importantes a controlar durante un proceso de congelación, por lo que predicción de éste es de gran relevancia para la obtención de un producto de calidad. En este sentido, el proceso de congelación por inmersión asistido con UAI y el efecto de éste sobre la duración del tiempo de congelación fue evaluado en la etapa de cambio de fase y en el inicio de la nucleación, a través de la obtención de curvas de congelación de diferentes matrices alimenticias (papa y jícama). El ultrasonido fue aplicado durante unos segundos (0, 5, 10, 15 y 20 s) una vez que la temperatura del centro geométrico de la muestra fue de 0°C. Se observó una reducción importante del tiempo de congelación del 20 al 35% en comparación de los experimentos sin

aplicación del ultrasonido. Sin embargo, de acuerdo con el tiempo de congelación predicho por la ecuación de Pham (Pham, 1984,8) y utilizando el valor  $h$  calculado a partir de la correlación de  $Nu$  propuesta en el presente trabajo, si se considera que el ultrasonido es irradiado durante todo el proceso de congelación, éste solo sería capaz de reducir el tiempo hasta un 20 %, mientras que para el tiempo de congelación experimental existió una reducción similar (20 %), pero con un menor tiempo de aplicación del ultrasonido durante el proceso de congelación. Por lo tanto, la reducción del tiempo de congelación en las matrices alimenticias no fue debido a la intensificación del proceso de transferencia de calor (un aumento en el valor del  $h$ ), sino a que el ultrasonido pudo anticipar el inicio de la nucleación. Esto se pudo observar mediante las curvas de congelación obtenidas para diferentes tiempos de aplicación del ultrasonido. Para las muestras de jícama, cuando el ultrasonido fue irradiado durante 5 s no existió una reducción en el tiempo de congelación y el inicio de la nucleación ocurrió de forma similar a las muestras no irradiadas con ultrasonido, en este caso, el tratamiento con ultrasonido no fue lo suficientemente largo para inducir el inicio de la nucleación. Caso contrario se observó cuando el ultrasonido fue aplicado durante 10s, disminuyendo el tiempo de congelación respecto a las muestras control. Este resultado es adecuado debido a que mayor tiempo de aplicación del ultrasonido, mayor es la intensidad de sus efectos (como la cavitación). Sin embargo, cuando el ultrasonido fue aplicado durante 20 s, el tiempo de congelación fue mayor en comparación con las muestras no irradiadas. En el caso de las curvas de congelación obtenidas de las muestras de papa, a diferencia de las obtenidas de las muestras de jícama, éstas mostraron una reducción del tiempo de congelación para todos los tiempos en que fue aplicado el ultrasonido respecto a los experimentos no irradiados. Por lo tanto, el ultrasonido en todos los casos logró desencadenar el inicio de la nucleación, lo cual fue más evidente al no presentar un alto grado de sobre-enfriamiento como las muestra control, las cuales mostraron una temperatura de inicio de nucleación de  $-6.7^{\circ}\text{C}$  y por lo tanto, un mayor tiempo de congelación. Para ambos se encontró que un tiempo de aplicación de 10 s del ultrasonido es el más adecuado, por lo que un mayor tiempo de aplicación ya no es favorable ya que la generación de calor que produce el ultrasonido aumenta el tiempo de duración de la etapa de cambio de fase y por lo tanto del tiempo total de congelación. Por lo tanto, de acuerdo con la naturaleza del producto a congelar existe un tiempo óptimo de aplicación del ultrasonido.

Además del efecto del tiempo de aplicación del ultrasonido sobre el tiempo total de congelación, también se analizó su influencia en diferentes parámetros de calidad de diferentes matrices alimenticias. Una de las características importantes que marcan la calidad de los productos congelados es su capacidad de conservar casi intactas sus características sensoriales como color y textura. En este sentido, cuando el ultrasonido fue aplicado durante 10 s se no afectó de manera importante el parámetro de color, obteniendo para la jícama y papa una diferencia de color con respecto a las muestras frescas ( $\Delta E^*$ ) de 2 a 3.4 y 1.9, respectivamente. De acuerdo con Nowak *et al.* (2019) y Tiwari *et al.*

(2008), si las diferencias de color son  $\Delta E^* > 3$ , la diferencia es muy distinta, si se encuentran entre  $1.5 < \Delta E^* < 3$ , la diferencia es distinta y si la  $\Delta E^* < 1.5$ , la diferencia es imperceptible.

Otro parámetro importante de calidad es la firmeza de la matriz alimenticia. En este caso se observó que, en general la congelación y posterior descongelación originan de manera inevitable que la muestra alimenticia sea más blanda que la muestra fresca, lo cual se debe a la degradación de la estructura causada por ambos procesos (congelación y ultrasonido). Para ambas muestras (jícama y papa) la menor disminución de la firmeza fue alcanzada cuando el ultrasonido fue irradiado durante 10 s, obteniendo valores de 21.5 y 24.24 N, respectivamente. Las menores diferencias de color  $\Delta E^*$  y una menor disminución de la firmeza obtenidas respecto a las muestras frescas a un tiempo de aplicación del ultrasonido de 10 s, puede estar relacionada a el hecho de que en estas experimentales se obtuvo un menor tiempo de congelación. Una rápida velocidad de congelación puede generar pequeños cristales de hielo, mientras que una baja velocidad puede producir la formación de grandes cristales de hielo y como consecuencia, daños en la estructura física, y por lo tanto, un deterioro en la calidad del producto final.

Finalmente, en la última sección de este apartado de resultados, se evaluó el impacto del proceso de congelación asistido con ultrasonido en el potencial antioxidante. Para ello, se determinó el contenido fenólico total (CFT) y capacidad antioxidante (CA) en muestras de betabel congeladas con diferentes tiempos de aplicación del ultrasonido (0, 5, 10, 15, 20 y 25 s). Los resultados mostraron que, en general, la congelación produjo una reducción de ambos parámetros. No obstante, a un tiempo de aplicación del ultrasonido de 15 s, se encontró la menor reducción de éstos, respecto a los valores obtenidos para las muestras frescas. La cantidad más alta del CFT fue de  $60.5 \pm 2.3$  mg GAE/100 g m.f. para los 15 s de aplicación del ultrasonido, mientras que la más baja fue de  $27.4 \pm 0.7$  mg GAE/100 g m.f. cuando éste fue aplicado 25 s, por lo tanto, esto indicó que una aplicación prolongada del ultrasonido disminuye el CFT. De manera similar, la mayor CA se obtuvo a los 15 s de aplicación del ultrasonido obteniendo valores de  $81.8 \pm 3.4$ ,  $101.3 \pm 2.1$  y  $487.5 \pm 30.4$  mg TROLOX/100 g m.f, para el ABTS, DPPH y FRAP, respectivamente. De manera general, se puede establecer que la aplicación de ultrasonido de alta intensidad durante la congelación de diferentes matrices alimenticias tuvo una influencia importante en la calidad final de los productos descongelados.

Para finalizar, el uso del ultrasonido en procesos de enfriamiento y/o congelación ha tomado relevancia en los últimos años debido a que intensifica estos procesos sin afectar en gran medida a la calidad del producto final. Es por este motivo, que el presente trabajo fue desarrollado con el fin de contribuir a profundizar el conocimiento de la influencia del UAI sobre procesos de transferencia de calor, a través de un análisis de la interacción de las variables de proceso y parámetros ultrasónicos.

# CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, en la presente tesis las conclusiones principales alcanzadas son presentadas y agrupadas en tres secciones.

## **Evaluación de la distribución del campo acústico y su impacto en el coeficiente de transferencia de calor por convección durante el enfriamiento asistido por ultrasonido.**

Se analizó la distribución de la actividad cavitacional y se encontró que la distribución de esta dentro del baño no es uniforme, obteniendo diferentes valores de IU, para una misma potencia eléctrica suministrada. Asimismo, los valores obtenidos de  $h$  indicaron que la distribución heterogénea de la actividad cavitacional afectaba el valor de estos, en cada posición evaluada, siendo en la posición 2 a 25 mm de altura del área de transducción, en donde se obtuvo el mayor valor de  $h$  (1137.0 (1095.4/1178.7) W/m<sup>2</sup>°C). Los resultados obtenidos demostraron que existe una correlación significativa entre la IU y el  $h$  ( $r=0.92$ ). La solución analítica del aplicada, para simular las cinéticas de enfriamiento de cilindros de papa y cobre, obtuvo un adecuado ajuste de los datos ( $R^2= 0.98$  y  $0.99$ , respectivamente), por lo tanto, los datos obtenidos podrían utilizarse para otros productos alimenticios con geometrías similares.

## **Análisis del proceso de calentamiento/enfriamiento por convección asistido por ultrasonido: desarrollo y aplicación de una ecuación de Nusselt**

El modelo de transferencia de calor desarrollado para el análisis del proceso de calentamiento/enfriamiento por convección asistido con UAI, permitió el desarrollo de una nueva ecuación de Nusselt, la cual mostró un adecuado ajuste con los datos experimentales. El modelo de conducción con un termino de fuente y la correlación de Nu propuesta se aplicaron con éxito en el análisis de la transferencia de calor durante el calentamiento asistido con ultrasonido a tiempos cortos y temperaturas moderadas del jamón curado, lo que permitió una nueva interpretación del efecto del ultrasonido en estos resultados. Los resultados teóricos podrían ser útiles para el diseño de experimentos y así poder evaluar la potencia ultrasónica absorbida por el producto y/o muestra y su dependencia con otras variables del proceso, abriendo así la necesidad de más investigaciones.

## **Efecto del UAI sobre el tiempo de congelación, inicio de la nucleación y sus propiedades fisicoquímicas**

Se evaluó efecto de la aplicación del ultrasonido sobre el tiempo congelación y se encontró que, una corta aplicación de la irradiación acústica puede inducir una nucleación temprana en las muestras alimenticias, produciendo con esto una reducción del tiempo de congelación. Los resultados obtenidos de la evaluación del color y firmeza, mostraron que el ultrasonido proporcione una mejor preservación de estos parámetros, en comparación del proceso convencional. Finalmente, un tiem-

po prolongado de exposición del ultrasonido puede reducir el CFT y CA, por lo que tiempos cortos de irradiación son convenientes para la preservación de las propiedades químicas de los alimentos.

De manera general, a partir de los resultados obtenidos en el presente trabajo, se concluye que la aplicación del UAI es una alternativa positiva para la mejora del proceso de congelación de alimentos, ya que además de favorecer y controlar el proceso de transferencia de energía, reduce los tiempos de procesamiento por la contribución de los efectos mecánicos propios de la cavitación, permitiendo la optimización del proceso de congelación y preservando las propiedades fisicoquímicas de los alimentos, contribuyendo a la calidad final del producto.

# CONTRIBUCIÓN CIENTÍFICA

## Artículo de investigación

Martínez-Ramos, T.; Corona-Jiménez, E. y Ruiz-López, I. I. 2021. Analysis of ultrasound-assisted convective heating/cooling process: Development and application of a Nusselt equation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 74, 105575.

## Estancia

Estancia doctoral en modalidad virtual en el Grupo de Análisis y Simulación de Procesos del Departamento de Tecnología de Alimentos de la Universitat Poliècnica de València.

Asesor: Dr. José Javier Benedito Fort.

Periodo: Septiembre de 2020 a Noviembre de 2021.

Actividad desarrollada: Trabajo científico en formato de artículo titulado “*Evaluation of acoustic field distribution and its impact on the convective heat transfer coefficient during ultrasonic-assisted cooling*”. (bajo revisión).

## Participación en congresos

Martínez-Ramos, T.; Benedito-Fort, J.; Ruiz-López, I. I.; Watson, N. J.; Ruiz-Peralta, L. y Corona-Jiménez, E. 2021. Evaluation of freezing time of potato (*Solanum tuberosum*) cylinders during ultrasound-assisted immersion freezing. 4th Conference on Innovations in Food Science and Human Nutrition. Londres, Inglaterra.

Martínez-Ramos, T.; Benedito-Fort, J.; Ruiz-López, I. I.; Watson, N. J. y Corona-Jiménez, E. 2021. Influence of the acoustic field on the enhancement of the heat transfer convective coefficient calculated by an analytical solution during the ultrasonic-assisted cooling. #LatinXChem Twitter Conference.

Martínez-Ramos, T.; Benedito-Fort, J.; Watson, N. J.; Che-Galicia, G. y Corona-Jiménez, E. 2020. Efecto de la composición del disolvente y su interacción con la intensidad ultrasónica en la extracción asistida por ultrasonido de compuestos fenólicos de las cáscaras de mango (*Mangifera indica L.*). XLI Encuentro nacional de la AMIDIQ. Evento virtual.

- Martínez-Ramos, T.; Alfonso-Martínez, A. Y.; Ruiz-López, I. I.; Sampieri-Croda, A. y Corona-Jiménez, E. 2020. Estudio de la transferencia de calor durante el proceso de enfriamiento/calentamiento asistido con la aplicación del ultrasonido de un cubo de cobre estacionario. XLI Encuentro nacional de la AMIDIQ. Evento virtual.
- Martínez-Ramos, T.; Flores-Cruz, L.; Che-Galicia, G. y Corona-Jiménez, E. 2020. Influencia del proceso de congelación por inmersión asistido con ultrasonido sobre el contenido fenólico y su capacidad antioxidante del betabel (*beta vulgaris*). XLI Encuentro nacional de la AMIDIQ. Evento virtual.
- Martínez-Ramos, T.; Ruiz-López, I. I. Moreno-Solar, B.G.; Sampieri-Croda, A.; Benedito-Fort, J. y Corona-Jiménez, E. 2019.Efecto de la distribución de la actividad cavitacional sobre el coeficiente de transferencia de calor convectivo de una esfera de cobre irradiada con ultrasonido. XL Encuentro nacional de la AMIDIQ. Huatulco, Oaxaca.
- Moreno-Solar, B.G.; Martínez-Ramos, T.; Ruiz-López, I. I.; Che-Galicia, G.; Ruiz-Espinosa, H. y Corona-Jiménez, E. 2019. Evaluación del uso del ultrasonido de alta intensidad sobre el tiempo de congelación de un cubo de papa (*solanum tuberosum*). XL Encuentro nacional de la AMIDIQ. Huatulco, Oaxaca.
- Martínez-Ramos, T.; Ruiz-López, I. I.; Escobedo-Morales, A.; Vega-Romero, G. M.; García-Alvarado, M. y Corona-Jiménez, E. 2018. Efecto de la distribución cavitacional sobre el tiempo de enfriamiento de una esfera de cobre irradiada con ultrasonido. XXXIX Encuentro nacional de la AMIDIQ. San José del Cabo, BCS.
- Vega-Romero, G. M.; García-Alvarado, M.; Ruiz-López, I. I.; Martínez-Ramos, T. y Corona-Jiménez, E. 2018. Topografía de un baño de ultrasonido de potencia en la eficiencia de extracción de fenoles de bagazo de uva (*vitis vinifera*) y en su calorimetría. XXXIX Encuentro nacional de la AMIDIQ. San José del Cabo, BCS.

# Bibliografía

- Al-Juboori, Raed A, Yusaf, Talal, Bowtell, Leslie, & Aravinthan, Vasantha. 2015. Energy characterisation of ultrasonic systems for industrial processes. *Ultrasonics*, **57**, 18–30.
- Alvarez, Catalina, Ospina, Sebastian, & Orrego, Carlos E. 2019. Effects of ultrasound-assisted blanching on the processing and quality parameters of freeze-dried guava slices. *Journal of Food Processing and Preservation*, **43**(12), e14288.
- Alzate, Carlos Eduardo Orrego. 2003. *Procesamiento de alimentos*. Univ. Nacional de Colombia.
- Arnao, Marino B. 2000. Some methodological problems in the determination of antioxidant activity using chromogen radicals: a practical case. *Trends in Food Science & Technology*, **11**(11), 419–421.
- Arvanitoyannis, Ioannis S, Kotsanopoulos, Konstantinos V, & Savva, Amalia G. 2017. Use of ultrasounds in the food industry—Methods and effects on quality, safety, and organoleptic characteristics of foods: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, **57**(1), 109–128.
- Awad, TS, Moharram, HA, Shaltout, OE, Asker, DYMM, & Youssef, MM. 2012. Applications of ultrasound in analysis, processing and quality control of food: A review. *Food research international*, **48**(2), 410–427.
- Baehr, Hans Dieter, & Stephan, Karl. 2011. Heat conduction and mass diffusion. *Pages 107–273 of: Heat and Mass Transfer*. Springer.
- Baffigi, Federica, & Bartoli, Carlo. 2012. Influence of the ultrasounds on the heat transfer in single phase free convection and in saturated pool boiling. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **36**(jan), 12–21.
- Barreiro, José A, & Sandoval, Aleida J. 2006. *Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas*. Equinoccio.
- Becker, Bryan R, & Fricke, Brian A. 1999. Freezing times of regularly shaped food items. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **26**(5), 617–626.
- Bhargava, Nitya, Mor, Rahul S, Kumar, Kshitiz, & Sharanagat, Vijay Singh. 2020. Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105293.
- Brennan, James G, & Grandison, Alistair S. 2012. *Food processing handbook*.
- Bulliard-Sauret, O., Berindei, J., Ferrouillat, S., Vignal, L., Momponteil, A., Poncet, C., Leveque, J.M., & Gondrexon, N. 2019. Heat transfer intensification by low or high frequency ultrasound: Thermal and hydrodynamic phenomenological analysis. *Experimental Thermal and Fluid Science*, **104**(jun), 258–271.
- Bulliard-Sauret, Odin, Ferrouillat, Sebastien, Vignal, Laure, Momponteil, Alain, & Gondrexon,

- Nicolas. 2017. Heat transfer enhancement using 2 MHz ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, **39**, 262–271.
- Butkhup, Luchai, Samappito, Wanee, & Samappito, Supachai. 2013. Phenolic composition and antioxidant activity of white mulberry (*Morus alba* L.) fruits. *International Journal of Food Science & Technology*, **48**(5), 934–940.
- Cai, Jun, Huai, Xiulan, Liang, Shiqiang, & Li, Xunfeng. 2010. Augmentation of natural convective heat transfer by acoustic cavitation. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, **4**(3), 313–318.
- Caine, WR, Aalhus, JL, Best, DR, Dugan, MER, & Jeremiah, LE. 2003. Relationship of texture profile analysis and Warner-Bratzler shear force with sensory characteristics of beef rib steaks. *Meat Science*, **64**(4), 333–339.
- Capote, F Priego, & de Castro, MD Luque. 2007. *Analytical applications of ultrasound*. Vol. 26. Elsevier.
- Cárcel, JA, García-Pérez, José Vicente, Benedito, J, & Mulet, A. 2012. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. *Journal of Food Engineering*, **110**(2), 200–207.
- Castillo-Santos, K, Ruiz-López, II, Rodríguez-Jimenes, GC, Carrillo-Ahumada, J, & García-Alvarado, MA. 2017. Analysis of mass transfer equations during solid-liquid extraction and its application for vanilla extraction kinetics modeling. *Journal of Food Engineering*, **192**, 36–44.
- Cengel, Yunus A. 2006. *Heat and Mass Transfer: A Practical Approach*. sl.
- Che-Galicia, Gamaliel, Váquiro-Herrera, Henry A, Sampieri, Álvaro, & Corona-Jiménez, Edith. 2020. Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from avocado leaves (*Persea americana* Mill. var. *Drymifolia*): optimization and modeling. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, **18**(7).
- Chemat, Farid, Rombaut, Natacha, Sicaire, Anne-Gaëlle, Meullemiestre, Alice, Fabiano-Tixier, Anne-Sylvie, & Abert-Vian, Maryline. 2017. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics sonochemistry*, **34**, 540–560.
- Chen, Shao Wen, Liu, Fang Chin, Lin, Hsiao Jou, Ruan, Pei Syuan, Su, Yu Ting, Weng, Yu Chi, Wang, Jong Rong, Lee, Jin Der, & Lin, Wei Keng. 2018a. Experimental test and empirical correlation development for heat transfer enhancement under ultrasonic vibration. *Applied Thermal Engineering*, **143**(September 2017), 639–649.
- Chen, Shao-Wen, Liu, Fang-Chin, Lin, Hsiao-Jou, Ruan, Pei-Syuan, Su, Yu-Ting, Weng, Yu-Chi, Wang, Jong-Rong, Lee, Jin-Der, & Lin, Wei-Keng. 2018b. Experimental test and empirical correlation development for heat transfer enhancement under ultrasonic vibration. *Applied*

- Thermal Engineering*, **143**, 639–649.
- Cheng, Lina, Sun, Da-Wen, Zhu, Zhiwei, & Zhang, Zi. 2017. Emerging techniques for assisting and accelerating food freezing processes: A review of recent research progresses. *Critical reviews in food science and nutrition*, **57**(4), 769–781.
- 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.
- Cheng, Xinfeng, Zhang, Min, Xu, Baoguo, Adhikari, Benu, & Sun, Jincai. 2015. The principles of ultrasound and its application in freezing related processes of food materials: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, **27**, 576–585.
- Choi, Eun Ji, Park, Hae Woong, Chung, Young Bae, Park, Sung Hoon, Kim, Jin Se, & Chun, Ho Hyun. 2017. Effect of tempering methods on quality changes of pork loin frozen by cryogenic immersion. *Meat science*, **124**, 69–76.
- Choi, Y, & Okos, MR. 1986. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. Food Engineering and Process Applications. *Transport Phenomena*, **1**.
- Chow, R, Blindt, R, Chivers, R, & Povey, M. 2005. A study on the primary and secondary nucleation of ice by power ultrasound. *Ultrasonics*, **43**(4), 227–230.
- Chow, Rachel, Blindt, Renoo, Chivers, Robert, & Povey, Malcolm. 2003. The sonocrystallisation of ice in sucrose solutions: primary and secondary nucleation. *Ultrasonics*, **41**(8), 595–604.
- Churchill, SW, & Bernstein, M. 1977. A correlating equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow. *ASME, Transactions, Series C-Journal of Heat Transfer*, **99**, 300–306.
- Cleland, AC, & Earle, RL. 1984. Freezing time predictions for different final product temperatures. *Journal of Food Science*, **49**(4), 1230–1232.
- 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.
- Conde, Manuel R. 2004. Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: Formulations for use in air conditioning equipment design. *International Journal of Thermal Sciences*, **43**(4), 367–382.
- Contreras, M., Benedito, J., Bon, J., & Garcia-Perez, J. V. 2018. Accelerated mild heating of dry-cured ham by applying power ultrasound in a liquid medium. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, **50**(October), 94–101.
- Corona, Edith, Garcia-Perez, Jose V, Alvarez-Arenas, Tomas E Gomez, Watson, Nicholas, Povey, Malcolm JW, & Benedito, Jose. 2013. Advances in the ultrasound characterization of dry-cured meat products. *Journal of Food Engineering*, **119**(3), 464–470.

- Corona, Edith, García-Pérez, José V, Santacatalina, Juan V, Ventanas, Sonia, & Benedito, José. 2014. Ultrasonic characterization of pork fat crystallization during cold storage. *Journal of Food Science*, **79**(5), E828–E838.
- Csoka, Levente, Katekhaye, Shital N, & Gogate, Parag R. 2011. Comparison of cavitation activity in different configurations of sonochemical reactors using model reaction supported with theoretical simulations. *Chemical Engineering Journal*, **178**, 384–390.
- Dalvi-Isfahan, M, Hamdami, N, & Le-Bail, A. 2016. Effect of freezing under electrostatic field on the quality of lamb meat. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **37**, 68–73.
- Dalvi-Isfahan, Mohsen, Hamdami, Nasser, Xanthakis, Epameinondas, & Le-Bail, Alain. 2017. Review on the control of ice nucleation by ultrasound waves, electric and magnetic fields. *Journal of Food Engineering*, **195**, 222–234.
- Delgado, Adriana, & Sun, Da-Wen. 2011. Ultrasound-accelerated freezing. *Pages 645–666 of: Handbook of Frozen Food Processing and Packaging, Second Edition*. CRC Press.
- Delgado, AE, & Sun, Da-Wen. 2001. Heat and mass transfer models for predicting freezing processes—a review. *Journal of Food Engineering*, **47**(3), 157–174.
- Delouei, A Amiri, Sajjadi, H, Mohebbi, R, & Izadi, M. 2019. Experimental study on inlet turbulent flow under ultrasonic vibration: Pressure drop and heat transfer enhancement. *Ultrasonics sonochemistry*, **51**, 151–159.
- Dhanalakshmi, NP, Nagarajan, R, Sivagaminathan, N, & Prasad, BVSSS. 2012. Acoustic enhancement of heat transfer in furnace tubes. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, **59**, 36–42.
- Dubie, Jeremiah. 2013. *Antioxidant Extraction from Brassica Juncea Seed Meal Using High-intensity Ultrasound for Use in Fresh Chilled Pork to Prolong Shelf Life*. Ph.D. thesis, University of Idaho.
- Dukhin, AS, Goetz, PJ, & Travers, B. 2005. Use of ultrasound for characterizing dairy products. *Journal of dairy science*, **88**(4), 1320–1334.
- Ensminger, Dale, & Bond, Leonard J. 2011. *Ultrasonics: fundamentals, technologies, and applications*. CRC press.
- Erdogdu, F, & Turhan, M. 2008. Analytical solutions in conduction heat transfer problems. *Optimization in Food Engineering (CRC, Boca Raton, FL, 2009)*, 19.
- Esclapez, MD, García-Pérez, José Vicente, Mulet, A, & Cárcel, JA. 2011. Ultrasound-assisted extraction of natural products. *Food Engineering Reviews*, **3**(2), 108–120.
- Fallah-Joshaqani, Saideh, Hamdami, Nasser, Keshavarzi, Ezat, Keramat, Javad, & Dalvi-Isfahan, Mohsen. 2019. Evaluation of the static electric field effects on freezing parameters of some food systems. *International Journal of Refrigeration*, **99**, 30–36.
- Fan, Kai, Zhang, Min, & Mujumdar, Arun S. 2017. Application of airborne ultrasound in the

- convective drying of fruits and vegetables: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, **39**, 47–57.
- Feng, Hao, Barbosa-Cánovas, Gustavo V, & Weiss, Jochen. 2011. *Ultrasound technologies for food and bioprocessing*. Vol. 1. Springer.
- Fikiin, Kostadin. 2007. *Handbook of frozen food processing and packaging*.
- Flick, Ernest W. 1999. *Industrial solvents handbook*. Vol. 37.
- Freixedas, Feliciano Grases, Bauzá, A Costa, & Söhnel, O. 2000. *Cristalización en disolución: conceptos básicos*. Reverté.
- Froessling, Nils. 1958. Evaporation, heat transfer, and velocity distribution in two-dimensional and rotationally symmetrical laminar boundary-layer flow.
- Fu, Xizhe, Belwal, Tarun, Cravotto, Giancarlo, & Luo, Zisheng. 2020. Sono-physical and sono-chemical effects of ultrasound: Primary applications in extraction and freezing operations and influence on food components. *Ultrasonics sonochemistry*, **60**, 104726.
- Gao, Penghui, Lan, Ruowen, Du, Yuji, Cheng, Bo, Zhang, Meng, & Zhang, Donghai. 2018. Droplet cooling and freezing characteristic in effect of ultrasonic. *Heat and Mass Transfer*, **55**(5), 1447–1464.
- Geankoplis, J., C. 2003. *Transport processes and separation process principles (Includes Unit Operations)*. Prentice Hall Professional Technical Reference.
- Gogate, Parag R. 2010. Theory of cavitation and design aspects of cavitation reactors. *Pages 31–67 of: Theoretical and Experimental Sonochemistry Involving Inorganic Systems*. Springer.
- Gogate, Parag R, Tatake, Prashant A, Kanthale, Parag M, & Pandit, Aniruddha B. 2002. Mapping of sonochemical reactors: review, analysis, and experimental verification. *AIChE Journal*, **48**(7), 1542–1560.
- Gülcin, İlhami. 2012. Antioxidant activity of food constituents: an overview. *Archives of toxicology*, **86**(3), 345–391.
- Guo, Qiushan, Sun, Da-Wen, Cheng, Jun-Hu, & Han, Zhong. 2017. Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, **67**, 236–247.
- Guo, Zonglin, Ge, Xiangzhen, Yang, Lihua, Ma, Guoyuan, Ma, Jibing, Yu, Qun-li, & Han, Ling. 2021. Ultrasound-assisted thawing of frozen white yak meat: Effects on thawing rate, meat quality, nutrients, and microstructure. *Ultrasonics Sonochemistry*, **70**, 105345.
- Hecht, Eugene. 1996. PHYSICS Calculus. Brooks. *Cole Grove CA*, 445–450.
- Heldman, DR, & Taylor, TA. 1997. Modeling of food freezing. *Pages 51–64 of: Quality in frozen food*. Springer.
- Hickling, Robert. 1965. Nucleation of freezing by cavity collapse and its relation to cavitation damage. *Nature*, **206**, 915–917.
- Hu, Song-Qing, Liu, Guang, Li, Lin, Li, Zhi-Xin, & Hou, Yi. 2013. An improvement in the im-

- mersion freezing process for frozen dough via ultrasound irradiation. *Journal of Food Engineering*, **114**(1), 22–28.
- Ibarz, Albert, & Barbosa-Cánovas, Gustavo V. 2002. *Unit operations in food engineering*. CRC press.
- Inada, Takaaki, Zhang, Xu, Yabe, Akira, & Kozawa, Yoshiyuki. 2001. Active control of phase change from supercooled water to ice by ultrasonic vibration 1. Control of freezing temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **44**(23), 4523–4531.
- Incropera, Frank, & De Witt, David P. 1999. *Fundamentos de transferencia de calor cuarta edición*.
- Incropera, Frank P, & DeWitt, David P. 1996. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons.
- Islam, Md Nahidul, Zhang, Min, Adhikari, Benu, Xinfeng, Cheng, & Xu, Bao-guo. 2014. The effect of ultrasound-assisted immersion freezing on selected physicochemical properties of mushrooms. *International Journal of Refrigeration*, **42**, 121–133.
- Islam, Md Nahidul, Zhang, Min, Fang, Zhongxiang, & Sun, Jincui. 2015. Direct contact ultrasound assisted freezing of mushroom (*Agaricus bisporus*): Growth and size distribution of ice crystals. *International Journal of Refrigeration*, **57**, 46–53.
- Jha, Piyush Kumar, Chevallier, Sylvie, Xanthakis, Epameinondas, Jury, Vanessa, & Le-Bail, Alain. 2020. Effect of innovative microwave assisted freezing (MAF) on the quality attributes of apples and potatoes. *Food chemistry*, **309**, 125594.
- Kaale, Lilian Daniel, & Eikevik, Trygve Magne. 2014. The development of ice crystals in food products during the superchilling process and following storage, a review. *Trends in Food Science & Technology*, **39**(2), 91–103.
- Karadag, Ayse, Ozcelik, Beraat, & Saner, Samim. 2009. Review of methods to determine antioxidant capacities. *Food analytical methods*, **2**(1), 41–60.
- 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, Sun, Da-Wen, & Zhang, Zhihang. 2013a. Effects of processing parameters on the convective heat transfer rate during ultrasound assisted low temperature immersion treatment of a stationary sphere. *Journal of Food Engineering*, **115**(3), 384–390.
- Kiani, Hossein, Sun, Da-Wen, & Zhang, Zhihang. 2013b. Effects of processing parameters on the

- convective heat transfer rate during ultrasound assisted low temperature immersion treatment of a stationary sphere. *Journal of Food Engineering*, **115**(3), 384–390.
- Kiani, Hossein, Zhang, Zhihang, & Sun, Da-Wen. 2015. Experimental analysis and modeling of ultrasound assisted freezing of potato spheres. *Ultrasonics Sonochemistry*, **26**, 321–331.
- Kidak, Rana, & Ince, Nilsun H. 2006. Ultrasonic destruction of phenol and substituted phenols: a review of current research. *Ultrasonics Sonochemistry*, **13**(3), 195–199.
- Kulkarni, Vrushali M, & Rathod, Virendra K. 2014. Mapping of an ultrasonic bath for ultrasound assisted extraction of mangiferin from *Mangifera indica* leaves. *Ultrasonics sonochemistry*, **21**(2), 606–611.
- Kwon, Oh Jin, Jung, Jae Hoon, & Kang, Yong Tae. 2020. Development of experimental Nusselt number and friction factor correlations for condensation of R-1233zd (E) in plate heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **158**, 120008.
- Laborde, J. L., Hita, A., Caltagirone, J. P., & Gerard, A. 2000. Fluid dynamics phenomena induced by power ultrasounds. *Ultrasonics*.
- 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.
- Lei, Xianliang, Guo, Yumeng, Zhang, Weiqiang, Li, Huixiong, & Li, Liangxing. 2019. Development of Heat Transfer Correlation for Supercritical Water in Vertical Upward Tubes. *Heat Transfer Engineering*, **40**(8), 652–666.
- Lévêque, Jean-Marc, Cravotto, Giancarlo, Delattre, François, & Cintas, Pedro. 2018. *Organic sonochemistry: Challenges and perspectives for the 21st century*. Springer.
- Li, Bin, Han, Xiaodong, Wan, Zhenping, Wang, Xiaowu, & Tang, Yong. 2016. Influence of ultrasound on heat transfer of copper tubes with different surface characteristics in sub-cooled boiling. *Applied Thermal Engineering*.
- 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.
- Li, Dongmei, Zhu, Zhiwei, & Sun, Da-Wen. 2018. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: A review. *Trends in Food Science & Technology*, **75**, 46–55.
- Liu, Donghong, Ma, Xiaobin, Wang, Wenjun, Zou, Mingming, Wang, Danli, & Ling, Jiangang. 2019. Research Progress on Power Ultrasound Technology. *Pages 149–187 of: Advances in Food Processing Technology*. Springer.
- Liu, Fang-Chin, Chen, Shao-Wen, & Lee, Jin-Der. 2018. Feasibility study of heat transfer enhancement by ultrasonic vibration under subcooled pool condition. *Heat Transfer Engineering*, **39**(7-8), 654–662.
- Lucas, T, Flick, D, & Raoult-Wack, AL. 1999. Mass and thermal behaviour of the food surface

- during immersion freezing. *Journal of food engineering*, **41**(1), 23–32.
- Luo, Jia, Fang, Zhen, Smith, Richard L, & Qi, Xinhua. 2015. Fundamentals of acoustic cavitation in sonochemistry. *Pages 3–33 of: Production of Biofuels and Chemicals with Ultrasound*. Springer.
- Lupacchini, Massimiliano, Mascitti, Andrea, Giachi, Guido, Tonucci, Lucia, d’Alessandro, Nicola, Martinez, Jean, & Colacino, Evelina. 2017. Sonochemistry in non-conventional, green solvents or solvent-free reactions. *Tetrahedron*, **73**(6), 609–653.
- Martínez-Ramos, T, Corona-Jiménez, E, & Ruiz-López, II. 2021. Analysis of ultrasound-assisted convective heating/cooling process: Development and application of a Nusselt equation. *Ultrasonics Sonochemistry*, **74**, 105575.
- Martínez-Ramos, Tania, Benedito-Fort, José, Watson, Nicholas James, Ruiz-López, Irving I, Chel Galicia, Gamaliel, & Corona-Jiménez, Edith. 2020. Effect of solvent composition and its interaction with ultrasonic energy on the ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from Mango peels (*Mangifera indica* L.). *Food and Bioproducts Processing*, **122**, 41–54.
- Mason, T J, Chemat, Farid, & Vinatoru, M. 2011. The extraction of natural products using ultrasound or microwaves. *Current Organic Chemistry*, **15**(2), 237–247.
- Mason, TJ, Paniwnyk, L, & Lorimer, JP. 1996. The uses of ultrasound in food technology. *Ultrasonics sonochemistry*, **3**(3), S253–S260.
- McClements, D Julian, & Gunasekaran, Sundaram. 1997. Ultrasonic characterization of foods and drinks: principles, methods, and applications. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, **37**(1), 1–46.
- Melissari, Blas, & Argyropoulos, Stavros A. 2005. Development of a heat transfer dimensionless correlation for spheres immersed in a wide range of Prandtl number fluids. *International journal of heat and mass transfer*, **48**(21), 4333–4341.
- Merouani, Slimane, Ferkous, Hamza, Hamdaoui, Oualid, Rezgui, Yacine, & Guemini, Miloud. 2015. A method for predicting the number of active bubbles in sonochemical reactors. *Ultrasonics sonochemistry*, **22**, 51–58.
- Mittal, Gauri S. 2011. Freezing Loads and Freezing Time Calculation. *Pages 129–146 of: Handbook of Frozen Food Processing and Packaging, Second Edition*. CRC Press.
- Moholkar, Vijayanand S, Sable, Shishir P, & Pandit, Aniruddha B. 2000. Mapping the cavitation intensity in an ultrasonic bath using the acoustic emission. *AIChE Journal*, **46**(4), 684–694.
- Mulet, A, Carcel, JA, Sanjuan, N, & Bon, J. 2003. New food drying technologies-Use of ultrasound. *Revista de Agaroquímica y Tecnología de Alimentos*, **9**(3), 215–221.
- Murcia, Ma Antonia, Jiménez, Antonia Ma, & Martínez-Tomé, Magdalena. 2009. Vegetables anti-oxidant losses during industrial processing and refrigerated storage. *Food Research International*, **42**(8), 1046–1052.

- Muthukumarappan, Kasiviswanathan, Marella, Chenchaiyah, & Sunkesula, V. 2019. Food freezing technology. *Pages 389–415 of: Handbook of farm, dairy and food machinery engineering*. Elsevier.
- Nagaoka, J, Takaji, S, & Hohani, S. 1955. Experiments on the freezing of fish in an air blast freezer. *Proc. 9th Intern. Congr. Refrig.*
- Nomura, Shinfuku, Murakami, Koichi, & Kawada, Makoto. 2002. Effects of turbulence by ultrasonic vibration on fluid flow in a rectangular channel. *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1: Regular Papers and Short Notes and Review Papers*, **41**(11), 6601–6605.
- Nowak, Konrad W, Zielinska, Magdalena, & Waszkielis, Katarzyna M. 2019. The effect of ultrasound and freezing/thawing treatment on the physical properties of blueberries. *Food science and biotechnology*, **28**(3), 741–749.
- Orlowska, Marta, Havet, Michel, & Le-Bail, Alain. 2009. Controlled ice nucleation under high voltage DC electrostatic field conditions. *Food research international*, **42**(7), 879–884.
- Ozuna López, César. 2014. *Estudio de la aplicación de ultrasonidos de alta intensidad en sistemas sólido-líquido y sólido-gas. Influencia en la cinética de transporte de materia y en la estructura de los productos*. Ph.D. thesis, Editorial Universitat Politècnica de València.
- Petzold, Guillermo, & Aguilera, José M. 2009. Ice morphology: fundamentals and technological applications in foods. *Food Biophysics*, **4**(4), 378–396.
- Pham, Q Tuan. 2006. Mathematical modeling of freezing processes. *Food Science and Technology- New York-Marcel Dekker-*, **155**, 141.
- 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.
- Picó, Yolanda. 2013. Ultrasound-assisted extraction for food and environmental samples. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **43**, 84–99.
- Poncet, Christophe, Ferrouillat, Sébastien, Vignal, Laure, Mempoiteil, Alain, Bulliard-Sauret, Odin, & Gondrexon, Nicolas. 2021. Enhancement of heat transfer in forced convection by using dual low-high frequency ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, **71**, 105351.
- Povey, Malcolm JW. 2017. Applications of ultrasonics in food science-novel control of fat crystallization and structuring. *Current opinion in colloid & interface science*, **28**, 1–6.
- Povey, Malcolm JW, & Mason, Timothy J. 1998. *Ultrasound in food processing*. Springer Science & Business Media.
- Qiu, Liqing, Zhang, Min, Chitrakar, Bimal, & Bhandari, Bhesh. 2020. Application of power ultrasound in freezing and thawing Processes: Effect on process efficiency and product quality. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105230.

- Rahman, M Shafiur. 2009. *Food properties handbook*. CRC press.
- 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.
- Rao, Priyanka R, & Rathod, Virendra K. 2015. Mapping study of an ultrasonic bath for the extraction of andrographolide from *Andrographis paniculata* using ultrasound. *Industrial Crops and Products*, **66**, 312–318.
- Raso, Javier, Manas, Pilar, Pagan, Rafael, & Sala, Francisco J. 1999. Influence of different factors on the output power transferred into medium by ultrasound. *Ultrasonics sonochemistry*, **5**(4), 157–162.
- Rastogi, Navin K. 2011. Opportunities and challenges in application of ultrasound in food processing. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, **51**(8), 705–722.
- Riesz, Peter, & Kondo, Takashi. 1992. Free radical formation induced by ultrasound and its biological implications. *Free Radical Biology and Medicine*, **13**(3), 247–270.
- Roohi, Reza, Abedi, Elahe, Hashemi, Seyed Mohammad Bagher, Marszałek, Krystian, Lorenzo, Jose Manuel, & Barba, Francisco J. 2019. Ultrasound-assisted bleaching: Mathematical and 3D computational fluid dynamics simulation of ultrasound parameters on microbubble formation and cavitation structures. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, **55**, 66–79.
- Saclier, Mathieu, Peczalski, Roman, & Andrieu, Julien. 2010. A theoretical model for ice primary nucleation induced by acoustic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, **17**(1), 98–105.
- Sadot, Mathieu, Curet, Sébastien, Chevallier, Sylvie, Le-Bail, Alain, Rouaud, Olivier, & Havet, Michel. 2020. Microwave assisted freezing part 2: Impact of microwave energy and duty cycle on ice crystal size distribution. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **62**, 102359.
- Sahagian, Michael E, & Goff, H Douglas. 1996. Fundamental aspects of the freezing process. *Food Science and Technology*, 1–50.
- Salvadori, VO, & Mascheroni, RH. 1991. Prediction of freezing and thawing times of foods by means of a simplified analytical method. *Journal of Food engineering*, **13**(1), 67–78.
- Santacatalina Bonet, Juan Vicente. 2016. *Contribución al estudio de la aplicación de ultrasonidos de alta intensidad en procesos de secado a baja temperatura*. Ph.D. thesis, Universitat Politècnica de València.
- 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.
- Schatte, Gerrit A, Kohlhepp, Andreas, Wieland, Christoph, & Spliethoff, Hartmut. 2016. Deve-

- lopment of a new empirical correlation for the prediction of the onset of the deterioration of heat transfer to supercritical water in vertical tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **102**, 133–141.
- Sekhon-Loodu, Satvir, Warnakulasuriya, Sumudu N, Rupasinghe, HP Vasantha, & Shahidi, Fe-reidoon. 2013. Antioxidant ability of fractionated apple peel phenolics to inhibit fish oil oxidation. *Food Chemistry*, **140**(1), 189–196.
- Sideman, Samuel. 1966. The equivalence of the penetration and potential flow theories. *Industrial & Engineering Chemistry*, **58**(2), 54–58.
- Singh, R Paul, & Heldman, Dennis R. 2001. *Introduction to food engineering*. Gulf Professional Publishing.
- Smith, Peter Geoffrey. 2003. Introduction to food process engineering. *Chemical engineer*, 56–56.
- Stavros, Yanniotis. 2008. Solving problems in food engineering.
- Sun, Qinxiu, Zhao, Xinxin, Zhang, Chao, Xia, Xiufang, Sun, Fangda, & Kong, Baohua. 2019. Ultrasound-assisted immersion freezing accelerates the freezing process and improves the quality of common carp (*Cyprinus carpio*) at different power levels. *Lwt*, **108**, 106–112.
- Sutariya, Suresh G, & Sunkesula, Venkateswarlu. 2021. Food Freezing: Emerging Techniques for Improving Quality and Process Efficiency a Comprehensive Review.
- Taler, Dawid. 2016. A new heat transfer correlation for transition and turbulent fluid flow in tubes. *International Journal of Thermal Sciences*, **108**, 108–122.
- Tao, Yang, Li, Dandan, Chai, Wai Siong, Show, Pau Loke, Yang, Xuhai, Manickam, Sivakumar, Xie, Guangjie, & Han, Yongbin. 2021. Comparison between airborne ultrasound and contact ultrasound to intensify air drying of blackberry: Heat and mass transfer simulation, energy consumption and quality evaluation. *Ultrasonics sonochemistry*, **72**, 105410.
- Thaipong, Kriengsak, Boonprakob, Unaroj, Crosby, Kevin, Cisneros-Zevallos, Luis, & Byrne, David Hawkins. 2006. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. *Journal of food composition and analysis*, **19**(6-7), 669–675.
- Thompson, LH, & Doraiswamy, LK. 1999. Sonochemistry: science and engineering. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **38**(4), 1215–1249.
- Tian, You, Zhang, Peizhi, Zhu, Zhiwei, & Sun, Da Wen. 2020. Development of a single/dual-frequency orthogonal ultrasound-assisted rapid freezing technique and its effects on quality attributes of frozen potatoes. *Journal of Food Engineering*, **286**, 110112.
- Tiwari, BK, Muthukumarappan, K, Oâdonnell, CP, & Cullen, PJ. 2008. Effects of sonication on the kinetics of orange juice quality parameters. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **56**(7), 2423–2428.
- Tocci, AM, & Mascheroni, RH. 1995. Heat and mass transfer coefficients during the refrigeration,

- freezing and storage of meats, meat products and analogues. *Journal of Food Engineering*, **26**(2), 147–160.
- Tu, Jing, Zhang, Min, Xu, Baoguo, & Liu, Huihua. 2015. Effects of different freezing methods on the quality and microstructure of lotus (*Nelumbo nucifera*) root. *International Journal of Refrigeration*, **52**, 59–65.
- Velázquez Rodríguez, Marco Antonio. 2014. Congelación de alimentos.
- Viollaz, PE, Suarez, C, & ALZAMORA, STELLA. 1980. Temperature prediction in air drying of food materials: a simple model. *International Journal of Food Science & Technology*, **15**(4), 361–367.
- Wan, Zhenping, Duan, Jiaochao, Wang, Xiaowu, & Zheng, Mujia. 2020. Saturated boiling heat transfer under ultrasound. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **115**, 104511.
- Watson, Nicholas, Povey, Malcolm, Corona, Edith, Benedito, J, & Parker, N. 2012. Acoustic microscopy in the food industry. *Page 012006 of: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 42. IOP Publishing.
- Wen, Tao, Zhan, Hongbo, Lu, Lin, & Zhang, Dalin. 2018. Experimental investigation and development of new correlation for flow boiling heat transfer in mini-channel. *International Journal of Thermal Sciences*, **129**, 209–217.
- Whitaker, Stephen. 1972. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles. *AIChE Journal*, **18**(2), 361–371.
- Whitaker, Stephen. 1977. Fundamental principles of heat transfer.
- Wu, Xiao-Fei, Zhang, Min, Adhikari, Benu, & Sun, Jincui. 2017. Recent developments in novel freezing and thawing technologies applied to foods. *Critical reviews in food science and nutrition*, **57**(17), 3620–3631.
- Xanthakis, Epameinondas, Le-Bail, Alain, & Ramaswamy, H. 2014. Development of an innovative microwave assisted food freezing process. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **26**, 176–181.
- Xin, Ying, Zhang, Min, & Adhikari, Benu. 2014a. The effects of ultrasound-assisted freezing on the freezing time and quality of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. botrytis L.) during immersion freezing. *International Journal of Refrigeration*, **41**, 82–91.
- Xin, Ying, Zhang, Min, & Adhikari, Benu. 2014b. Ultrasound assisted immersion freezing of broccoli (*Brassica oleracea* L. var. botrytis L.). *Ultrasonics Sonochemistry*, **21**(5), 1728–1735.
- Xu, Bao-guo, Zhang, Min, Bhandari, Bhesh, Cheng, Xin-feng, & Islam, Md Nahidul. 2015. Effect of ultrasound-assisted freezing on the physico-chemical properties and volatile compounds

- of red radish. *Ultrasonics Sonochemistry*, **27**, 316–324.
- 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.
- Yao, Ye, Pan, Yue, & Liu, Shiqing. 2020. Power ultrasound and its applications: A state-of-the-art review. *Ultrasonics Sonochemistry*, **62**(apr), 104722.
- Yasui, Kyuichi. 2018. *Acoustic cavitation and bubble dynamics*. Springer.
- Zhan, Ximing, Sun, Da-Wen, Zhu, Zhiwei, & Wang, Qi-Jun. 2018. Improving the quality and safety of frozen muscle foods by emerging freezing technologies: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, **58**(17), 2925–2938.
- Zhang, Xu, Inada, Takaaki, Yabe, Akira, Lu, Shushen, & Kozawa, Yoshiyuki. 2001. Active control of phase change from supercooled water to ice by ultrasonic vibration 2. Generation of ice slurries and effect of bubble nuclei. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **44**(23), 4533–4539.
- 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.
- Zhao, Ying, & Takhar, Pawan S. 2017. Freezing of Foods: Mathematical and Experimental Aspects. *Food Engineering Reviews*, 1–12.
- Zheng, Liyun, & Sun, Da-Wen. 2005. Ultrasonic assistance of food freezing. *Pages 603–626 of: Emerging technologies for food processing*. Elsevier.
- Zhu, X, & Sun, DW. 2001. The effects of thermal conductivity calculation on the accuracy of freezing time predicted by numerical methods. *Airah Journal*, **55**(10), 32–34.
- Zhu, Zhiwei, Chen, Zhubing, Zhou, Qianyun, Sun, Da-Wen, Chen, Haiyang, Zhao, Yongjun, Zhou, Wenqing, Li, Xianguang, & Pan, Hongzhun. 2018. Freezing Efficiency and Quality Attributes as Affected by Voids in Plant Tissues During Ultrasound-Assisted Immersion Freezing. *Food and Bioprocess Technology*, **11**(9), 1615–1626.
- Zhu, Zhiwei, Zhang, Peizhi, & Sun, Da-Wen. 2020. Effects of multi-frequency ultrasound on freezing rates and quality attributes of potatoes. *Ultrasonics Sonochemistry*, **60**, 104733.

# A. Evaluación del coeficiente de transferencia de calor interno y del mecanismo dominante para la transferencia de calor

El coeficiente de transferencia de calor interno  $D$  con frecuencia se representa como (Viollaz *et al.*, 1980; Castillo-Santos *et al.*, 2017)

$$D = \frac{k_s}{\phi L} \quad (1.1)$$

donde  $\phi$  es un factor geométrico evaluado a partir de la solución analítica de la ecuación de conducción transitoria, asumiendo una resistencia *interfacial* despreciable y un volumen infinito de la fase líquida. La solución analítica para la ecuación de conducción transitoria tiene la siguiente forma general

$$\frac{\mathbf{T} - T_{ss}}{T_0 - T_{ss}} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 \alpha t}{L^2}\right) \quad (1.2)$$

donde  $T_0$  y  $T_{ss}$  representan la temperatura inicial y de estado estable, respectivamente,  $\alpha$  es la difusividad térmica,  $A$  es el coeficiente,  $\lambda$  es un valor propio de la solución y  $L$  es la longitud característica de conducción. La derivada con respecto al tiempo del primer término de la Ecuación 1.2 es

$$\frac{d\mathbf{T}}{dt} = -\frac{\lambda_1^2 \alpha t}{L^2} (\mathbf{T} - T_{ss}) \quad (1.3)$$

donde  $\lambda_1$  es el primer valor propio (eigenvalor) de la solución analítica. Por otro lado, las Ecuaciones 5.15, 5.16, 5.17 y 1.1 se pueden combinar y expresar de la siguiente manera, asumiendo (1) que no hay irradiación del ultrasonido ( $P = 0$ ), (2) un proceso controlado por el mecanismo de conducción ( $T_i = T_{ss}$ ) y (3) propiedades constantes ( $\rho_s$ ,  $C_{ps}$ ,  $V$  y  $\varepsilon$ ).

$$\frac{d\mathbf{T}}{dt} = -\frac{k_s A}{\phi L \rho_s C_{ps} (1 - \varepsilon) V} (\mathbf{T} - T_{ss}) \quad (1.4)$$

Combinando las Ecuaciones 1.3 y 1.4 se obtiene

$$\phi = \frac{aL}{\lambda_1^2} \quad (1.5)$$

$$a = \frac{A}{(1 - \varepsilon)V} \quad (1.6)$$

donde  $a$  es el área específica del sólido. La Tabla A1 presenta las expresiones para  $a$ ,  $\lambda_1$  y  $\phi$  de las configuraciones geométrías más comunes. La relación entre la resistencia convectiva y conductiva a la transferencia de calor se puede estimar a partir del número de Biot.

$$Bi = \frac{hL}{k_s} \quad (1.7)$$

Tabla A1. Parámetros de geometría para la estimación del coeficiente de transferencia de calor interno.

Geometría	Área específica	Primer eigenvalor al cuadrado ( $\lambda_1^2$ ) *	$\phi = aL/\lambda_1^2$
Placa plana	$1/L$	$\pi^2/4$	$4/\pi^2$
Cilindro infinito	$2/L$	$(2.4048)^2$	$2/(2.4048)^2$
Esfera	$3/L$	$\pi^2$	$3/\pi^2$
Cilindro finito	$(2 + 1/\delta)/L$	$\pi^2/(4\delta^2) + (2.4048)^2$	$(8\delta^2 + 4\delta) / (\pi^2 + 4(2.4048)^2 \delta^2)$
Cubo	$3/L$	$3\pi^2/4$	$4/\pi^2$

La suposición de una distribución uniforme de la temperatura dentro del sólido es adecuada si el número de  $Bi < 0.1$  (Incropera & DeWitt, 1996). En este caso, no es necesario realizar múltiples mediciones de temperatura dentro del sólido, ya que la temperatura del centro o de la superficie se puede tomar como un valor promedio de la temperatura ( $\mathbf{T}$ ). Por otra parte, si el número de  $Bi > 0.1$ , entonces se puede suponer una aproximación parabólica de la temperatura dentro del producto,

$$\psi = \psi_c + (\psi_s - \psi_c) \zeta^2 \quad (1.8)$$

donde  $\psi_c$  y  $\psi_s$  representan la temperatura adimensional en el centro y la superficie del sólido, respectivamente.

La temperatura adimensional promedio se puede obtener a partir del promedio volumétrico de la Ecuación 1.8 para obtener

$$\frac{\mathbf{T} - T_{ss}}{T_0 - T_{ss}} = \frac{2}{3 + \beta} \psi_c + \frac{1 + \beta}{3 + \beta} \psi_s \quad (1.9)$$

donde  $\beta$  toma los valores 0, 1 y 2 para las geometrías de placa plana, cilindro infinito y esfera, respectivamente. Las soluciones para el cubo y el cilindro finito se pueden obtener de la Ecuación 1.8 aplicando el principio de superposición.

Finalmente, una expresión para evaluar el error en la estimación del coeficiente de transferencia de calor por convección cuando se desprecia la resistencia interna a la transferencia de calor (es decir, tomando  $H \approx h$ ) se puede obtener combinando las Ecuaciones 5.19, 1.1 y 1.7,

$$e(\%) = 100 \frac{-\phi Bi}{\phi Bi + 1} \quad (1.10)$$