

## Ultrasonido en el procesamiento (homogenización, extracción y secado) de alimentos

## Ultrasound in the processing (homogenization, extraction and drying) of foods

## Ultra-som de processamento (homogeneização, extração e secagem) food

YESENIA CAMPO-VERA<sup>1</sup>, VÍCTOR M. GÉLVEZ-ORDOÑEZ<sup>2</sup>, ALFREDO AYALA-APONTE<sup>3</sup>

### RESUMEN

*En los últimos años el uso del ultrasonido en el procesamiento de los alimentos se ha incrementado debido a las ventajas que presenta sobre los procesos convencionales por la reducción de tiempos y temperatura, mezclado efectivo, aumento de la transferencia de masa y energía, la reducción de los gradientes térmicos y de concentración, extracción selectiva, una respuesta más rápida al control de procesos de extracción, aumento de la tasa de producción, eliminación de microorganismos y enzimas sin destruir los nutrientes de los alimentos. Además, de considerarse una tecnología limpia, aplicable en las diferentes fases del procesamiento de alimentos*

**Recibido para evaluación:** 23 de Marzo de 2017.

**Aprobado para publicación:** 13 de Marzo de 2018.

- 1 Instituto Superior de Educación Rural, Facultad de Ingenierías e informática, Grupo de investigación en ciencia, tecnología e innovación. Magister en ciencias, tecnología de los alimentos. Pamplona, Colombia.
- 2 Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de investigación en Innovaciones Alimentarias. Doctor Ciencia y tecnología de Alimentos. Pamplona, Colombia.
- 3 Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería de Alimentos, Grupo de investigación de procesos agroalimentarios y biotecnológicos. Doctor Ciencia y tecnología de Alimentos. Cali, Colombia

**Correspondencia:** [yesenia.campo.vera@gmail.com](mailto:yesenia.campo.vera@gmail.com)

como: secado, homogeneización y extracción. El ultrasonido de baja potencia (alta frecuencia) se utiliza para el seguimiento de la composición y propiedades fisicoquímicas de los componentes del alimento y el de alta potencia (baja frecuencia) induce cambios mecánicos, físicos químicos y bioquímicos por acción de la cavitación, que soporta muchas operaciones de procesamiento de alimentos. Esta revisión resume la aplicación del ultrasonido en el procesamiento de homogeneización, extracción y secado en alimentos, con el fin de conocer los aspectos generales: definición, mecanismos, efectos; aplicaciones y futuras tendencias de aplicación en la industria alimentaria.

## ABSTRACT

In recent years the use of ultrasound in the processing of food has increased due to the advantages it presents over conventional processes by reducing time and temperature, effective mixing, increased mass and energy transfer, reduction of the thermal and concentration gradients, selective extraction, a faster response to the control of extraction processes, increase of the production rate, elimination of microorganisms and enzymes without destroying the nutrients of the food. In addition, to be considered a clean technology, applicable in the different phases of food processing such as: drying, homogenization and extraction. Ultrasound of low power (high frequency) is used to monitor the composition and physicochemical properties of food components and high power (low frequency) induces mechanical, physical chemical and biochemical changes by the action of cavitation, which supports Many food processing operations. This review summarizes the application of ultrasound in the processing of homogenization, extraction and drying in food, in order to know the general aspects: definition, mechanisms, effects; applications and future application trends in the food industry.

## RESUMO

Nos últimos anos, o uso de ultra-som no processamento de alimentos aumentou devido às vantagens que apresenta em relação aos processos convencionais, reduzindo o tempo e a temperatura, mistura efetiva, aumento de massa e transferência de energia, reduzindo os gradientes térmicos e de concentração, extração seletiva, uma resposta mais rápida ao controle de processos de extração, aumento da taxa de produção, eliminação de microorganismos e enzimas sem destruir os nutrientes dos alimentos. Além disso, deve ser considerada uma tecnologia limpa, aplicável nas diferentes fases de processamento de alimentos, tais como: secagem, homogeneização e extração. O ultra-som de baixa potência (alta frequência) é usado para monitorar a composição e as propriedades físico-químicas dos componentes de alimentos e alta potência (baixa frequência) induz mudanças mecânicas, físicas químicas e bioquímicas pela ação da cavitação, que suporta Muitas operações de processamento de alimentos. Esta revisão resume a aplicação de ultra-som no processamento de homogeneização, extração e secagem em alimentos, a fim de conhecer os aspectos gerais: definição, mecanismos, efeitos; aplicações e futuras tendências de aplicação na indústria de alimentos.

## PALABRAS CLAVES:

Cavitación,  
Conservación,  
Ondas acústicas,  
Tecnología verde.

## KEYWORDS:

Cavitation,  
Conservation,  
Acoustic waves,  
Green technology.

## PALABRAS CHAVE:

Cavitação,  
Conservação,  
Ondas sonoras,  
Tecnologia verde.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el mercado ha evolucionado considerablemente debido al desarrollo de numerosas tecnologías para la conservación de los alimentos. Actualmente, el consumidor es cada vez más exigente, demandando alimentos de mejor calidad, similares a sus equivalentes frescos, con excelentes características nutricionales, sanos y que garanticen su seguridad.

La humanidad necesita alimentos como parte intrínseca de su mecanismo biológico, la actual demanda de alimentos mínimamente procesados que sean seguros, conserven las características nutricionales y respeten las exigencias medioambientales; justifica el desarrollo de tecnologías para la conservación y transformación de alimentos. Esta evolución y desarrollo obligan a las industrias alimentarias a adaptarse a nuevas técnicas de producción y a la demanda de nuevos productos en el mercado [1].

Las tecnologías convencionales para la conservación de alimentos se basan en tratamientos térmicos, que causan en ocasiones la degradación de la calidad; ventaja que tienen los productos procesados con tecnologías no térmicas (alta presión hidrostática, ultrasonido, pulsos eléctricos de alta intensidad de campo, irradiación, pulsos lumínicos, campos magnéticos oscilantes o aditivos químicos y bioquímicos, entre otros) al minimizar pérdidas de nutrientes esenciales y características organolépticas [2].

El ultrasonido (US) es una técnica novedosa usada en la industria alimentaria, ya que representa ventaja sobre los procesos tradicionales, al reducir tiempos de proceso, mejorar atributos de calidad, no alterar las principales características de los productos, reduce riesgos químicos, físicos y se considera tecnología verde al ser sustentable, debido a que emplea menos tiempo, agua y energía [2,3].

El uso de ondas ultrasónicas de elevada intensidad en procesos industriales se basa generalmente en una explotación adecuada de una serie de mecanismos activados por la energía ultrasónica tales como transferencia de calor, agitación, difusión, inestabilidad en las interfases, fricción, rotura mecánica, efectos químicos, entre otros. Estos mecanismos son empleados para producir o mejorar una amplia gama de procesos tales como soldadura de plásticos y metales, mecanizado,

formación de metales, atomización, emulsificación y dispersión, desgasificación, extracción desespumado, aglomeración de partículas, secado y extracción de lípidos en suspensiones, reacciones sonoquímicas [4].

El US ha sido empleado en diferentes investigaciones de la industria de alimentos y existe un gran interés en ello, debido a que se puede aplicar de forma práctica: aplicado directamente al producto, acoplada a un dispositivo y sumergido en un baño ultrasónico [3]. Teniendo como ventajas la efectividad contra células vegetativas, esporas y enzimas, reducción de los tiempos y temperaturas de proceso, fácil adaptación en líneas de producción continuos o intermitentes, incrementos de los fenómenos de transferencia de calor, modificación de la estructura y textura en alimentos, efecto sobre la actividad enzimática, entre otros [5].

El presente documento analiza la aplicación del ultrasonido en el procesamiento de homogenización, extracción y secado en alimentos, con el fin de conocer los aspectos generales: definición, mecanismos y efectos; aplicaciones y futuras tendencias de aplicación en la industria alimentaria.

## APLICACIÓN EN PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS

### Homogenización/emulsificación

Una emulsión es una mezcla de dos líquidos inmiscibles de manera más o menos homogénea. Un líquido (la fase dispersa) es dispersado en otro (la fase continua o fase dispersante). Muchas emulsiones son de aceite/agua, con grasas alimenticias como uno de los tipos más comunes de aceites encontrados en la vida diaria. Generalmente las emulsiones de alimentos tienen dos fases: una fase acuosa que consiste en agua que contiene sales, azúcares, ácidos en solución y/o otras sustancias orgánicas o coloidales y una fase oleosa que consiste en aceites, grasas, ceras, resinas, aceites esenciales y otros materiales hidrofóbicos. Una emulsión estable es un sistema en el que los glóbulos conservan su carácter inicial y permanecen distribuidos uniformemente en la fase continua [6,7].

La estabilidad de una emulsión depende de diversos factores [6,7]:

- El tamaño de los glóbulos de la fase dispersa
- La diferencia de densidad de ambas fases
- La viscosidad de la fase continua y de la emulsión
- Las fuerzas de interfase que actúan en la superficie de los glóbulos
- La naturaleza, eficacia y cantidad de emulsificante y estabilizante
- Las circunstancias de almacenamiento (temperaturas altas y bajas, agitación o vibración, evaporación)

Las emulsiones pueden ser obtenidas por medios mecánicos tales como: molino coloidal, homogeneizador, mezclador o baja frecuencias generador por US. El US presenta ventajas frente los métodos convencionales [8]:

- La emulsión producida tiene tamaños de partículas muy pequeñas, inferior a la micra.
- Las emulsiones son más estables.
- No es necesario la adición de tensoactivos [9].
- La energía necesaria para producir una emulsión es menor.
- Es fácil de usar e integrar a líneas industriales.

El US mejora la calidad de los productos emulsionados como: la homogeneización de la leche, rendimiento del queso [10], vida útil, propiedades texturales, el sabor, y una mayor aceptación de los consumidores [6]. Sin embargo, el US en el proceso de emulsificación también pueden alterar las fases lipídica, por un aumento de la temperatura causado por el fenómeno de cavitación. La oxidación lipídica es uno de los defectos más importantes que se produce y que favorece el desarrollo del mal olor, color inusual y compuestos nocivos [11]. Para evitar estos fenómenos de oxidación, se suele añadir antioxidante, como aceites esenciales [12]; aceites vegetales como de naranja presentan características, como Antioxidante, antimicrobianos, aromáticos o aromatizantes y disminuyen la oxidación del aceite comestible durante el tiempo de almacenamiento [6].

El US se ha utilizado en el proceso de homogenización, distribución y desaglomeración de partículas de polvos para la obtención de cerámica [13]; mejorando la estructura, las propiedades dieléctricas de la cerámica, disminuyendo el tamaño de las partículas, activando y acelerando la formación las partículas de los polvos [14].

Nguyen and Anema (2017) evaluaron la aplicación de US (frecuencia de 22,5 kHz/50 W/20 a 80°C/0 a 30 min) en leche entera, observando que este reduce significativamente el tamaño los glóbulos de grasa de muestra en comparación de la homogenización convencional [16,17], en productos como yogures y leche ,descremada a base de leche entera termosonificada causa una incremento en la firmeza [15,16]; puede ser debido a la cavitación que causa turbulencia, colisiones violentas, fuerzas cizalla y aumento de temperatura durante el proceso [18].

### **Aceleración en procesos de extracción**

La extracción se ha utilizado desde el inicio de las civilizaciones, utilizada para producir perfumes, cosméticos o alimentos. En la actualidad es una operación unitaria para la línea de producción en las industrias alimentaria, farmacéutica, cosmética, nutracéuticos, o bioenergía, que no utilizan procesos de extracción, tales como (maceración, extracción con disolventes, vapor o hidro-distilación, prensado en frío, exprimido, entre otras) [19]. La extracción es una tecnología que tiene dos desventajas para la industria: el costo que requiere el montaje de su operación y de la energía total del proceso [20].

Las técnicas de extracción utilizados para los compuestos vegetales son destilación, extracción con disolvente (maceración, la digestión, la infusión, decocción, percolación y extracción continua en caliente), nado contra corriente extracción, compresión fría, y no convencionales, métodos a saber, la extracción con fluidos supercríticos, (turbo) de extracción de torbellino, extracción por la energía eléctrica y la extracción asistida por US [21].

En los últimos tiempos, se ha considerado la utilización de técnicas de extracción más eficientes susceptibles de la automatización, tales como extracción asistida por US; que reduce los tiempos de extracción, el consumo de disolvente orgánico, re-

duce, el uso de disolventes tóxicos, energía y costos [22,23]. Estos resultados impulsaron el desarrollo de técnicas combinadas de extracción como extracción Soxhlet asistida por US, destilación asistida por US, extracción continua asistida por US, y combinación de US con otras tecnologías, tales como microondas, extrusión, y extracción con fluidos supercríticos [19].

La extracción asistida por US es un proceso corto (minutos) con alta reproducibilidad, reduciendo el consumo de disolvente, lo que simplifica la manipulación y el trabajo en marcha, dar una mayor pureza del producto final, la eliminación de después del tratamiento de las aguas residuales y el consumo de sólo una fracción de la energía fósil necesaria normalmente para una extracción convencional [3].

La extracción asistida por ultrasonido (EAU) puede beneficiar a la industria química en múltiples formas [8, 24,25]:

- Mejorar los rendimientos de la extracción.
- Mejora los procesos de extracción acuosa sin utilizar disolventes.
- Proporcionar la oportunidad de utilizar disolventes de limpieza y/o verdes alternativos mediante la mejora de su extracción actuación.
- Mejorar la extracción de componentes sensibles al calor en condiciones que de otro modo tendría baja o rendimientos inaceptable.

Los efectos físicos de propagación que causa el US en un medio se basan en el fenómeno de cavitación que produce altas fuerzas de cizallamiento y micro-chorros de superficie que genera varios efectos tales como degradación y desgaste en la superficial de las partículas [26,27]. Además, la cavitación causa ciclos de expansión y contracción en el material expuesto, lo que causa una interrupción en las paredes celulares de la matriz sólida y esto favorece la penetración de la transferencia de disolvente y la masa, aumentando así la tasa de extracción [28,29].

Los efectos químicos del US generan radicales altamente reactivos en la matriz, como por ejemplo en el agua, se generan radicales por la disociación del agua ( $H_2O \rightarrow OH\cdot + H\cdot$ ); que aumentan la cantidad

de radicales hidroxilo y puede dañar cualquier célula que entran en contacto [25].

La eficiencia de la EAU puede ser afectada por varios variables, tales como la composición del disolvente, temperatura, amplitud, ciclo, pH disolvente y la relación de disolvente sólido [28,30].

La aplicación del US para la extracción de diferentes tipos de compuestos en alimentos como: frutas, verduras, hierbas, especias, semillas de oleaginosas y microorganismos se ha corroborado en diferentes estudios (Cuadro 1).

Las frutas y verduras son frecuentemente utilizadas para la extracción de varias moléculas de interés (metabolitos secundarios), tales como antioxidantes, pigmentos, lípidos, fitoquímicos y aromas, destinados a aplicaciones directas o indirectas en los alimentos, industrias farmacéuticas y cosméticas. Las hierbas y especias son comúnmente utilizados para la alimentación, cosmética o farmacéutica aplicaciones como fuentes de diversos compuestos de interés tales como antioxidantes, aromas, sabores, fragancias o compuestos volátiles que se pueden extraer de diferentes matrices tales como pimienta, romero o semillas de alcaravea por ejemplo [3].

Las semillas de plantas oleaginosas son un recurso renovable disponible en todo el mundo, como soya, girasol, linaza, o de frutas (nueces, almendras, semillas de papaya, frutas sin cáscara). A partir de todas las fuentes de lípidos (semillas oleaginosas) es posible obtener glicerinas, ácidos grasos libres, pigmentos, esteroides, antioxidantes, alcaloides [30]. Los microorganismos tales como bacterias, levaduras, hongos y microalgas son capaces de producir metabolitos interesantes primarias y secundarias como pigmentos, antioxidantes, polisacáridos, ácidos, lípidos empleadas para aplicaciones cosméticas, alimentarias, farmacéuticas y de biocombustibles [19].

## Secado

El secado es un método clásico para la conservación de alimentos, tiene la ventaja de reducir el peso para su transporte y de disminuir las necesidades de espacio para su almacenamiento [45]. El secado incrementa la estabilidad de los alimentos al reducir la actividad de agua, limitando la acción microbiológica y

**Cuadro 1.** Aplicaciones del US en la extracción de compuestos.

Matriz	Extracto	Dispositivo de procesamiento	Condiciones experimentales	Referencia
<b>Frutas y verduras</b>				
Orujo de uva	Compuesto fenólicos	US sonda (20 kHz, 130 W, 13 mm)	T = 60-85°C/ t = 10-60 min/ V = 200 mL/ Solvente: etanol, agua, etanol acuoso al 50%, etanol acuoso al 70%, y 70% metanol acuoso.	[31]
Morera ( <i>Morus nigra</i> ) de pulpa	Compuestos fenólicos-Antocianinas	US baño (200 W, 24 kHz)	T = 48°C/ t = 10 min/V = 600 mL Solvente: 76% Metanol en agua.	[28]
Patata	Polifenoles Antocianinas Proteínas	US baño (45 kHz, 178 W)	T = 80°C/ t = 40 min/Solvente: etanol 58%	[32]
Patata	Antocianinas Compuestos fenólicos	US baño (20 kHz, 150 W)	T = 68°C/ t = 52 min/ Disolvente: Agua	[33]
Alfalfa	Flavonoides	US baño (40 kHz, 110 W)	T = 60°C/t = 50 min/Solvente: etanol 52,14 %	[34]
Arándanos	Antocianinas	US sonda (50 kHz, 1500 W)	T = 25°C/t = 40 min /Solvente: etanol 70 %	[35]
Mora	Antocianinas	US sonda (24 kHz, 400 W, 14 mm)	T = 50°C/t =60 min/Solución acuosa 30 % de etanol.	[36]
<b>Hierbas, especias</b>				
Flores de <i>Limonium sinuatum</i>	Antioxidantes	US baño (40 kHz, 400 W)	T = 40°C/t = 9,8 min / Solvente: etanol 60%	[37]
Flores de <i>Hemerocallis citrina</i> .	Flavonoides	US baño (40 kHz, 500 W)	T = 55°C/t = 20 min / Solvente: etanol 70%	[38]
<b>Microorganismos</b>				
Cichorium intybus L. var. sativum	Polifenoles	US baño (30.8 kHz, 0-100 W)	T = 20-60°C/ t = 120 min/ V = 600 mL7 Solvente: etanol 0-60%	[39]
<b>Residuos agroindustriales</b>				
Residuo de café molido	Compuestos fenólicos-Flavonoides	US sonda (20 kHz, 244 W, 12,5 mm)	T = 40°C/t = 34 min7SL=1:17 g / ml	[40]
Cáscaras de cítricos (naranja, limón y mandarina)	Flavonoides	US baño (45 kHz, 130 W)	T = 60°C/t = 60 min Solvente: etanol 96%	[41]
Filamentos de maíz	Polifenoles	US sonda (25 kHz, 520 W)	t = 15 min Solvente: etanol 61.08 %	[42]
Cascara de la fruta del árbol de jaca	Pectina	US sonda (2 cm)	T = 60°C/t = 24min Solvente: etanol 95%	[43]
Cáscara de maracuyá	Pectina	US baño (40 kHz, 110 W)	T = 45°C/t = 20 min Solvente: etanol al 96%	[44]

los cambios fisicoquímicos que se producen durante el almacenamiento. Por el contrario, el secado produce una pérdida de calidad en el producto debido a los cambios estructurales y bioquímicos; dependiendo de la técnica y de la temperatura de secado.

La técnica más convencional de secado que utiliza bajas temperaturas es la liofilización, donde se pueden obtener productos de mayor calidad; pero con tiempos muy largos en el proceso, mayores a los del secado por aire caliente. El secado es un proce-

so complejo en el que se produce una transferencia simultánea de materia y de energía, la modelización constituye una herramienta necesaria para analizar estos procesos y la influencia de las condiciones de operación [46]; la transferencia de materia dentro del alimento se produce únicamente por los gradientes de humedad, lo que se conoce como mecanismo difusivo. Así, la modelización de las cinéticas de secado permite obtener parámetros como la difusividad efectiva del producto, parámetro esencial para abordar la optimización del proceso de secado [47].

Nuevos tratamientos previos al proceso de secado, se basan en la manipulación química que han logrado reducir los tiempos de secado [48]. Recientemente, se ha aplicado el US en el secado por aire caliente consiguiendo la reducción del tiempo de procesado y el consumo energético de la operación, al conseguir temperaturas inferiores adecuadas para el secado [49]. Además, ha demostrado que aumenta la tasa de transferencia de calor y masa en un medio líquido, y la transmisión acústica y las vibraciones son las principales razones en un ambiente gaseoso durante el secado [50].

Do Nascimento (2016) evaluaron el efecto de la aplicación del US (21,7 kHz, 30,8 kW/m<sup>3</sup> a 40, 50, 60 y 70°C) en el cinética de secado (1 ms<sup>-1</sup>) de cáscara de fruta de la pasión. Observando que el aumento de la temperatura reduce significativamente el tiempo de secado, el modelamiento (dos modelos de difusión sobre la base de la segunda ley de Fick) mostró que la aplicación de US aumentó tanto la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de masa a, 40 y 50°C.

Campo (2016) evaluaron el efecto del pretratamiento con US (40 KHz/130W a 30°C durante 30 min) en el secado convectivo (60°C/2 m/s) de en rodajas de 3mm±1 espesor de fresa (*Fragaria vesca*), observando una disminución en el tiempo de secado del 49% (1,45 h). El modelamiento mostró que la aplicación de US aumenta la difusividad efectiva y el coeficiente de transferencia de masa; reflejado en la reduciendo del consumo de energía, los costos totales del proceso [53].

Barman and Badwaik (2017) realizaron un pretratamiento con US durante 30 min a rodajas de carambola (5 mm de espesor) y luego una deshidratación osmótica (DO) con glucosa, sacarosa, fructosa y glicerol a 70° Brix de concentración de soluto, 50°C y durante 180 min; mostrando una pérdida del 73,76% de agua y ganancia de sólidos 9,79%. Este fenómeno se debe probablemente a la formación de microcanales por la compresión sistemática, alterna y la descompresión del material (llamado "efecto esponja") [55], que facilita la salida de agua de la matriz en forma de vapor por sublimación causan un aumento en las velocidades de secado [45].

La formación de microcanales causa la separación y la interrupción de las células como respuesta a la aplicación de US, sin originar desintegración de las células como lo corroboran experimentos previos con melones, papayas y piñas [56,57]. Fresas sometidas a

pretratamiento con US en una deshidratación osmótica mostraron que la textura de la fruta estaba modificada debido a la disolución de pectina y el desglose de células después de 30 min de los períodos de tratamiento previo [58]. Además, esta reducción se puede atribuir a la energía mecánica que el US genera en el proceso de cavitación; provocando la disminución de la resistencia interna y externa a la transferencia de materia y la aparición de fenómenos como la generación de microcorrientes en las interfases o las compresiones y descompresiones en el material sólido contribuyen a facilitar la salida de agua de la matriz [59,45].

Los resultados encontrados son coherentes con los reportados por algunos autores que han evaluado el efecto del US en el secado de diferentes frutas y vegetales como: en fresas se observó un efecto positivo sobre la velocidad de secado convectivo a 70°C y 60W de potencia, logrando una reducción del 35% [60] y del 50% en inmersión de solución de sacarosa [61], en papa a 200W/25 kHz la disminución fue del 32% en tiempo de secado [62]; en manzanas a 50W/21,9 kHz se obtuvo una de descenso medio del tiempo de secado por la aplicación del US del 55% para alcanzar una pérdida de peso del 80% respecto del peso inicial y de 80,3% a -10°C y 75 W [45]; en berenjena a 90W una disminución del 72% [61]; en zanahorias fue del 41-53% en el tiempo de secado [63]; en hojas de perejil a 21 kHz/12 W/g, contribuyó a una reducción significativa del tiempo de secado de hasta 29,8% [64]; en mora la velocidad de secado se incrementó en casi cinco veces cuando las muestras se trataron con US a 90 micras/20 min [54], en pimentón verde a 200W reducción en tiempo fue de 39% [65], en hojas de morera a 25,2 kHz a 63 W/L/10 min reduce el tiempo de secado en un 17,2% [66].

El US transmite su energía para el material que se seca, lo que provoca un "efecto de calentamiento" en forma de un aumento de temperatura [59]. Durante el secado, la humedad es transportada dentro del material a su superficie (flujo de humedad interna) y luego se descarga para el medio ambiente a través de la capa límite del medio de secado (Flujo de humedad externa). Ambos de los flujos mencionados anteriormente se pueden mejorar mediante el US [53].

Para el flujo interno, muchos autores han mostrado un aumento en el coeficiente de difusión eficaz debido a la aplicación de US, lo que significa que la transferencia de masa se aceleró en el interior del

material; un incremento de este tipo puede resultar a partir de dos fenómenos: (1) los cambios en la estructura y/o propiedades de material. (2) interacciones dinámicas con el material que se secan [53].

El primer fenómeno puede surgir de tanto una modificación espacial en la estructura del material (geometría) y los cambios en las propiedades fisicoquímicas (tales como viscosidad, tensión superficial, fuerza de adhesión). Además, se observó que el uso de US dio lugar a un daño en la estructura del material expuesto, debido a la pérdida de la coherencia en el tejido, roturas en la membrana celular y la pared, formación de microcanales y aumento de la porosidad [67,53].

Durante el secado las ondas ultrasónicas producen una compresión y expansión sucesiva de la parte sólida del material, este fenómeno es llamado "efecto esponja" debido a la similitud de apretar y soltar una esponja. Las fuerzas involucradas en este mecanismo pueden ser mayores que la tensión superficial que mantiene las moléculas de agua dentro de los capilares poros [68], promoviendo la transferencia del agua desde el interior a la superficie de la muestra.

### Futuras tendencias

Los consumidores en la actualidad demandan alimentos frescos, de calidad, prácticos, innovadores, nutritivos, incluyendo los nuevos productos "mínimamente procesados". Para satisfacer las expectativas del consumidor en cuanto al frescor y al aspecto práctico, en el siglo XXI se utilizarán nuevas tecnologías con un doble objetivo: 1) ofrecer los nuevos atributos de calidad exigidos por los consumidores; y 2), garantizar la seguridad de los alimentos, cuestión siempre importante y dada por supuesta [69].

El cambio de concepción de los consumidores hacia los productos frescos, libres de aditivos y mínimamente procesados con tecnologías no térmicos, demanda que la calidad y seguridad alimentaria investigue nuevos métodos y tecnologías para identificar y controlar posibles peligros en los alimentos [70].

En este panorama, el uso del US se ha destacado como una tecnología potencial en procesamiento de alimentos. En particular mejorando la eficiencia de algunos procesos como: secado, extracción, cristalización, homogeneización, filtración, fermentación, inactivación

enzimática y microbiológica. Además, de garantizar la estabilidad y conservación del producto durante el almacenamiento, parámetro importante en la garantía de calidad de los productos alimenticios [69].

Así mismo, estudios de Campo (2016) han demostrado la insuficiencia de estudios utilizando el US como pretratamiento en el secado de frutas, con la comparación de diferentes técnicas como: secado convectivo, refractancia y liofilización; que evalúen la eficiencia del proceso y la reducción de costos para la producción automatizada a escala industrial.

## CONCLUSIONES

El US se considera una tecnología versátil, innovadora y verde al ser no tóxica y respetuosa del medio ambiente, ya que ahorra energía y maximiza la producción. El campo de aplicación del US es diverso en la ciencia y tecnología de los alimentos, incluyendo métodos de análisis y elaboración de alimentos, como la congelación, secado, templado, la homogeneización, la desgasificación, antiespumante, filtración, extracción, estudio de la composición y conservación de alimentos. Con ventajas significativas en comparación a tratamientos térmicos como: minimizar la pérdida de sabor, el aumento de la homogeneidad, el ahorro de energía, alta productividad, mejorar la calidad, la reducción de riesgos químicos y físicos, entre otras; sin efectos adversos sobre la salud humana.

## REFERENCIAS

- [1] OHLSSON, T. and BENGTTSSON, N. Minimal processing technologies in the food industry. 1 ed. Cambridge (England): Woodhead Publishing, 2002, p. 34-57
- [2] MASON, T.J., PANIWNKY, L. and LORIMER, J.P. The uses of ultrasound in food technology. *Ultrasonics sonochemistry*, 3(3), 1996, p. S253-S260.
- [3] CHEMAT, F., ZILL E, H. and KHAN, M.K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 2011, p. 813-835.
- [4] JOYCE, E.M. and MASON, T.J. Sonication used as a biocide. A review: ultrasound a greener alternative to chemical biocides. *Chemistry Today*, 26(6), 2008, p. 22-26.

- [5] ROBLES-OZUNA, L.E. and OCHOA-MARTÍNEZ, L.A. Ultrasonido y sus aplicaciones en el procesamiento de alimentos. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 13(2), 2012, p. 109-122.
- [6] KACI, M., ARAB-TEHRANY, E., DESJARDINS, I., BANON-DESOBRY, S. and DESOBRY, S. Emulsifier free emulsion: Comparative study between a new high frequency ultrasound process and standard emulsification processes. *Journal of Food Engineering*, 194, 2017, p. 109-118.
- [7] SILVA, E.K., GOMES, M.T.M., HUBINGER, M.D., CUNHA, R.L. and MEIRELES, M.A.A. Ultrasound-assisted formation of annatto seed oil emulsions stabilized by biopolymers. *Food Hydrocolloids*, 47, 2015, p. 1-13.
- [8] SANI, A.M. and SARDARODIYAN, M. Ultrasound applications for the preservation, extraction, processing and quality control of food. *BioTechnology: An Indian Journal*, 12(4), 2016, p. 162-174.
- [9] KACI, M., ARAB-TEHRANY, E., DOSTERT, G., DESJARDINS, I., VELOT, E. and DESOBRY, S. Efficiency of emulsifier-free emulsions and emulsions containing rapeseed lecithin as delivery systems for vectorization and release of coenzyme Q 10: physico-chemical properties and in vitro evaluation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 147, 2016, p. 142-150.
- [10] SORIA, A.C. and VILLAMIEL, M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 21(7), 2010, p. 323-331.
- [11] ZHAO, Y.Y., WANG, P., ZOU, Y.F., LI, K., KANG, Z.L., XU, X.L. and ZHOU, G.H. Effect of pre-emulsification of plant lipid treated by pulsed ultrasound on the functional properties of chicken breast myofibrillar protein composite gel. *Food Research International*, 58, 2014, p. 98-104.
- [12] HASHTJIN, A.M. and ABBASI, S. Optimization of ultrasonic emulsification conditions for the production of orange peel essential oil nanoemulsions. *Journal of food science and technology*, 52(5), 2015, p. 2679-2689.
- [13] AKBAS, H.Z., AYDIN, Z., YILMAZ, O. and TURGUT, S. Effects of ultrasonication and conventional mechanical homogenization processes on the structures and dielectric properties of BaTiO<sub>3</sub> ceramics. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 2017, p. 873-880.
- [14] MARKOVIĆ, S., MITRIĆ, M., STARČEVIĆ, G. and USKOKOVIĆ, D. Ultrasonic de-agglomeration of barium titanate powder. *Ultrasonics sonochemistry*, 15(1), 2008, p. 16-20.
- [15] NGUYEN, N.H. and ANEMA, S.G. Effect of ultrasonication on the properties of skim milk used in the formation of acid gels. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 11(4), 2010, p. 616-622.
- [16] CHANDRAPALA, J. and LEONG, T. Ultrasonic processing for dairy applications: recent advances. *Food Engineering Reviews*, 7(2), 2015, p. 143-158.
- [17] SFAKIANAKIS, P., TOPAKAS, E. and TZIA, C. Comparative study on high-intensity ultrasound and pressure milk homogenization: Effect on the kinetics of yogurt fermentation process. *Food and bioprocess technology*, 8(3), 2015, p. 548-557.
- [18] GELVEZ, V.M., CAMPO, Y. y VILLADA, D. C. Efecto del ultrasonido en las propiedades físicas de la leche entera. *Revista Bistua*, 13, 2015, p. 79-90.
- [19] CHEMAT, F., ROMBAUT, N., SICAIRE, A.G., MEULLEMIESTRE, A., FABIANO-TIXIER, A.S. and ABERT-VIAN, M. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 2017, p. 540-560.
- [20] CHEMAT, F., ROMBAUT, N., FABIANO-TIXIER, A.S., PIERSON, J.T. and BILY, A. Green Extraction: From Concepts to Research, Education, and Economical Opportunities. *Green Extraction of Natural Products: Theory and Practice*, 2015, p. 1-36.
- [21] DRANCA, F. and OROIAN, M. Optimization of ultrasound-assisted extraction of total monomeric anthocyanin (TMA) and total phenolic content (TPC) from eggplant (*Solanum melongena* L.) peel. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 2016, p. 637-646.
- [22] AVHAD, D.N. and RATHOD, V.K. Ultrasound assisted production of a fibrinolytic enzyme in a bioreactor. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 2015, p. 257-264.
- [23] CORBIN, C., FIDEL, T., LECLERC, E.A., BARAKZOY, E., SAGOT, N., FALGUIÉRES, A. and HANO, C. Development and validation of an efficient ultrasound assisted extraction of phenolic compounds from flax (*Linum usitatissimum* L.) seeds. *Ultrasonics Sonochemistry*, 26, 2015, p. 176-185.
- [24] KHAN, M., AHMAD, K. HASSAN, S. IMRAN, M. AHMAD, N. XU, C. Effect of novel technologies on polyphenols during food processing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 45 (2018) 361-381

- [25] TIWARI, B.K. Ultrasound: A clean, green extraction technology. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 71, 2015, p. 100-109.
- [26] MARAN, J.P. Statistical optimization of aqueous extraction of pectin from waste durian rinds. *International Journal of Biological Macromolecules*, 73, 2015, p. 92-98.
- [27] MARAN, J.P. and PRIYA, B. Ultrasound-assisted extraction of pectin from sisal waste. *Carbohydrate Polymers*, 115, 2015, p. 732-738.
- [28] ESPADA-BELLIDO, E., FERREIRO-GONZÁLEZ, M., CARRERA, C., PALMA, M., BARROSO, C.G. and BARBERO, G.F. Optimization of the ultrasound-assisted extraction of anthocyanins and total phenolic compounds in mulberry (*Morus nigra*) pulp. *Food Chemistry*, 219, 2017, p. 23-32.
- [29] SANTOS, P., AGUIAR, A.C., BARBERO, G.F., REZENDE, C.A. and MARTÍNEZ, J. Supercritical carbon dioxide extraction of capsaicinoids from malagueta pepper (*Capsicum frutescens* L.) assisted by ultrasound. *Ultrasonics Sonochemistry*, 22, 2015, p. 78-88.
- [30] SETYANINGSIH, W., DUROS, E., PALMA, M. and BARROSO, C. Optimization of the ultrasound-assisted extraction of melatonin from red rice (*Oryza sativa*) grains through a response surface methodology. *Applied Acoustics*, 103, 2016, p. 129-135.
- [31] GOULA, A.M., THYMIATIS, K. and KADERIDES, K. Valorization of grape pomace: Drying behavior and ultrasound extraction of phenolics. *Food and Bioproducts Processing*, 100, 2016, p.132-144.
- [32] ZHU, Z., GUAN, Q., KOU BAA, M., BARBA, F.J., ROOHINEJAD, S., CRAVOTTO, G. and HE, J. HPLC-DAD-ESI-MS2 analytical profile of extracts obtained from purple sweet potato after green ultrasound-assisted extraction. *Food Chemistry*, 215, 2017, p. 391-400.
- [33] ZHU, Z., GUAN, Q., GUO, Y., HE, J., LIU, G., LI, S. and JAFFRIN, M.Y. Green ultrasound-assisted extraction of anthocyanin and phenolic compounds from purple sweet potato using response surface methodology. *International Agrophysics*, 30(1), 2016, p. 113-122.
- [34] JIANG, H.L., YANG, J.L. and SHI, Y.P. Optimization of ultrasonic cell grinder extraction of anthocyanins from blueberry using response surface methodology. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 2017, p. 325-331.
- [35] JING, C.L., DONG, X.F. and TONG, J.M. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of flavonoid compounds and antioxidants from Alfalfa using response surface method. *Molecules*, 20(9), 2015, p. 15550-15571.
- [36] BARBA, F.J., GALANAKIS, C.M., ESTEVE, M.J., FRIGOLA, A. and VOROBIEV, E. Potential use of pulsed electric technologies and ultrasounds to improve the recovery of high-added value compounds from blackberries. *Journal of Food Engineering*, 167, 2015, p. 38-44.
- [37] XU, D.P., ZHENG, J., ZHOU, Y., LI, Y., LI, S. and LI, H. B. Ultrasound-assisted extraction of natural antioxidants from the flower of *Limonium sinuatum*: Optimization and comparison with conventional methods. *Food Chemistry*, 217, 2017, p. 552-559.
- [38] YANG, R.F., GENG, L.L., LU, H.Q. and FAN, X.D. Ultrasound-synergized electrostatic field extraction of total flavonoids from *Hemerocallis citrina baroni*. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 2017, p. 571-579.
- [39] PRADAL, D., VAUCHEL, P., DECOSSIN, S., DHULSTER, P. and DIMITROV, K. Kinetics of ultrasound-assisted extraction of antioxidant polyphenols from food by-products: Extraction and energy consumption optimization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 32, 2016, p. 137-146.
- [40] AL-DHABI, N.A., PONMURUGAN, K. and MARAN-JEGANATHAN, P. Development and validation of ultrasound-assisted solid-liquid extraction of phenolic compounds from waste spent coffee grounds. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 2017, p. 206-213.
- [41] CAMPO, Y., VILLADA, D. y GELVEZ, V. Evaluación del efecto de pre-tratamiento con ultrasonido en la extracción de flavonoides contenidos en las cascaras de cítricos. *Revista Vitae*, 23, 2016, p. 95-99.
- [42] LINGZHU, L., LU, W., DONGYAN, C., JINGBO, L., SONGYI, L., HAIQING, Y. and YUAN, Y. Optimization of ultrasound-assisted extraction of polyphenols from maize filaments by response surface methodology and its identification. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 88, 2015, p. 152-163.
- [43] MOORTHY, I.G., MARAN, J.P., ILAKYA, S., ANITHA, S., SABARIMA, S.P. and PRIYA, B. Ultrasound assisted extraction of pectin from waste *Artocarpus heterophyllus* fruit peel. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 2017, p. 525-530.
- [44] CAMPO-VERA, Y., VILLADA-CASTILLO, D. C. y MENESES-ORTEGA, J.D. Efecto del pre-tratamiento con Ultrasonido en la extracción de Pectina contenida en el albedo Del maracuyá (*Passiflora edulis*). *Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(1), 2016, p. 103-109.

- [45] SANTACATALINA, J.V., CONTRERAS, M., SIMAL, S., CÁRCEL, J.A. and GARCIA-PEREZ, J.V. Impact of applied ultrasonic power on the low temperature drying of apple. *Ultrasonics Sonochemistry*, 28, 2016, p. 100-109.
- [46] GARCIA-NOGUERA, J., OLIVEIRA, F.I., GALLÃO, M.I., WELLER, C.L., RODRIGUES, S. and FERNANDES, F.A. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: Effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. *Drying Technology*, 28(2), 2010, p. 294-303.
- [47] GARCIA-PEREZ, J.V., ORTUÑO, C., PUIG, A., CÁRCEL, J.A. and PEREZ-MUNUERA, I. Enhancement of water transport and microstructural changes induced by high-intensity ultrasound application on orange peel drying. *Food and Bioprocess Technology*, 5(6), 2012, p. 2256-2265.
- [48] GARCÍA-PÉREZ, J., CÁRCEL, J., RIERA, E. and MULET, A. Influence of the applied acoustic energy on the drying of carrots and lemon peel. *Drying Technology*, 27(2), 2009, p. 281-287.
- [49] MAJID, I., NAYIK, G.A. and NANDA, V. Ultrasonication and food technology: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 1(1), 2015, p. 1-11.
- [50] YAO, Y. Enhancement of mass transfer by ultrasound: Application to adsorbent regeneration and food drying/dehydration. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 2016, p. 512-531.
- [51] DO NASCIMENTO, E.M.G.C.M., ASCHERI, A., RAMÍREZ DE CARVALHO, J.L., WANDERLEI, C. and PILER CÁRCEL, J.A. Effects of high-intensity ultrasound on drying kinetics and antioxidant properties of passion fruit peel. *Journal of Food Engineering*, 170, 2016, p. 108-118.
- [52] CAMPO, Y., VILLADA, D. y GELVEZ, V. Efecto de la aplicación de ultrasonido sobre las cinéticas de secado convectivo de fresa (*Fragaria vesca*). *Revista Vitae*, 23, 2016, p. 100-104.
- [53] MUSIELAK, G., MIERZWA, D. and KROEHNKE, J. Food drying enhancement by ultrasound – A review. *Trends in Food Science & Technology*, 56, 2016, p. 126-141.
- [54] BARMAN, N. and BADWAIK, L.S. Effect of ultrasound and centrifugal force on carambola (*Averrhoa carambola* L.) slices during osmotic dehydration. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 2017, p. 37-44.
- [55] WIKTOR, A., SLEDZ, M., NOWACKA, M., RYBAK, K. and WITROWA-RAJCHERT, D. The influence of immersion and contact ultrasound treatment on selected properties of the apple tissue. *Applied Acoustics*, 103, 2016, p. 136-142.
- [56] FERNANDES, F.A., GALLÃO, M.I. and RODRIGUES, S. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. *Journal of Food Engineering*, 90(2), 2009, p. 186-190.
- [57] FERNANDES, F.A.N., GALLÃO, M.I. and RODRIGUES, S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: Melon dehydration. *LWT - Food Science and Technology*, 41(4), 2008, p. 604-610.
- [58] PRINZIVALLI, C., BRAMBILLA, A., MAFFI, D., SCALZO, R. L. and TORREGGIANI, D. Effect of osmosis time on structure, texture and pectic composition of strawberry tissue. *European Food Research and Technology*, 224(1), 2006, p. 119-127.
- [59] KOWALSKI, S.J., PAWŁOWSKI, A., SZADZIŃSKA, J., ŁECHTAŃSKA, J. and STASIAK, M. High power airborne ultrasound assist in combined drying of raspberries. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 34, 2016, p. 225-233.
- [60] GAMBOA-SANTOS, J., SORIA, A.C., PÉREZ-MATEOS, M., CARRASCO, J.A., MONTILLA, A. and VILLAMIEL, M. Vitamin C content and sensorial properties of dehydrated carrots blanched conventionally or by ultrasound. *Food Chemistry*, 136(2), 2013, p. 782-788.
- [61] GARCÍA-PÉREZ, J.V., OZUNA, C., ORTUÑO, C., CÁRCEL, J.A. and MULET, A. Modeling ultrasonically assisted convective drying of eggplant. *Drying Technology*, 29(13), 2011, p. 1499-1509.
- [62] KROEHNKE, J., MUSIELAK, G. and BORA-TYŃSKA, A. Convective drying of potato assisted by ultrasound. *PhD Interdisciplinary Journal*, 1, 2014, p. 57-65.
- [63] CHEN, Z.G., GUO, X.Y. and WU, T. A novel dehydration technique for carrot slices implementing ultrasound and vacuum drying methods. *Ultrasonics Sonochemistry*, 30, 2016, p. 28-34.
- [64] SLEDZ, M., WIKTOR, A., RYBAK, K., NOWACKA, M., & WITROWA-RAJCHERT, D. The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves. *Applied Acoustics*, 103, 2016, p. 148-156.
- [65] SZADZIŃSKA, J., ŁECHTAŃSKA, J., KOWALSKI, S.J. and STASIAK, M. The effect of high power airborne ultrasound and microwaves on convective drying effectiveness and quality of green pepper. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 2017, p. 531-539.
- [66] TAO, Y., WANG, P., WANG, Y., KADAM, S. U., HAN, Y., WANG, J. and ZHOU, J. Power ultrasound as a pretreatment to convective drying of mulberry

- (*Morus alba* L.) leaves: Impact on drying kinetics and selected quality properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 2016, p. 310-318.
- [67] CORRÉA, J.L.G., RASIA, M.C., GARCIA-PEREZ, J.V., MULET, A., DE JESUS JUNQUEIRA, J.R. and CÁRCEL, J.A. Use of Ultrasound in the Distilled Water Pretreatment and Convective Drying of Pineapple Drying and Energy Technologies, 2016, p. 71-87.
- [68] ANTENTAS, J.M. y VIVAS, E. Impacto de la crisis en el derecho a una alimentación sana y saludable. Informe SESPAS 2014. *Gaceta sanitaria*, 28, 2014, p. 58-61.
- [69] HUANG, H.W., WU, S.J., LU, J.K., SHYU, Y.T. and WANG, C.Y. Current status and future trends of high-pressure processing in food industry. *Food Control*, 72, 2017, p. 1-8.
- [70] ASHOKKUMAR, M. Applications of ultrasound in food and bioprocessing. *Ultrasonics Sonochemistry*, 25, 2015, p. 17-23.