

© 2022 Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.  
Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).  
TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 25: 1-14, 2022.  
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.459>

## Revisión sobre las tecnologías emergentes no térmicas para el procesamiento de alimentos

Esmeralda Caballero-Figueroa<sup>1</sup>, Eduardo Terrés<sup>2</sup>,  
Hilda María Hernández-Hernández<sup>3\*</sup> y Monserrat Escamilla-García<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, C.U. Cerro de las Campanas s/n, Querétaro 76010, Querétaro, México. <sup>2</sup>Laboratorio de Caracterización de Materiales Naturales y Sintéticos, Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas # 152, Col. San Bartolo Atepehuacan, Alcaldía G. A. Madero 07730, Cd. de México, México. <sup>3</sup> Tecnología Alimentaria, CONACYT – Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C. (CIATEJ), Guadalajara 44270 Jalisco, México. E-mail: \*hhernandez@ciatej.mx

### RESUMEN

En la actualidad la inocuidad de los alimentos es el principal objetivo de la industria alimentaria sin dejar de lado su calidad sensorial y nutricional, por esto las tecnologías emergentes no térmicas se presentan como una alternativa a las convencionales con el fin de subsanar, evitar o disminuir la modificación de la textura, el color y el desarrollo de sabores indeseables generados al tratar térmicamente a los alimentos. En el presente trabajo se describen las nuevas tecnologías, entre ellas, la alta presión hidrostática, los pulsos eléctricos, el ultrasonido de alta frecuencia, la radiación ionizante y el plasma en frío, así como los mecanismos de inactivación de los microorganismos; además de una sinopsis de las ventajas y desventajas de su aplicación, finalmente se presentan las áreas de oportunidad para su desarrollo industrial y empleo permanente.

**Palabras clave:** altas presiones hidrostáticas, pulsos eléctricos, plasma frío, ultrasonido, irradiación de alimentos.

### Review of emerging non-thermal technologies for food processing

### ABSTRACT

Currently, food safety is the main objective of the food industry without neglecting its sensory and nutritional quality, so the emerging technologies are presented as an alternative to conventional ones, in order to correct, avoid or reduce the modification of texture, color and development of undesirable flavors generated by thermally treating foods. Therefore, in this paper non-thermal emerging technologies are shown, such as: high hydrostatic pressure, electrical pulses, high-frequency ultrasound, ionizing radiation and cold plasma, as well as their mechanisms for inactivating microorganisms. A brief review of the advantages and disadvantages of the application of these technologies in food is made and finally the areas of opportunity that drive the development and widespread application of emerging non-thermal technologies are presented.

**Keywords:** high hydrostatic pressure, pulsed electric field, atmospheric cold plasma, ultrasound, ionising radiation.

## INTRODUCCIÓN

Una de las principales preocupaciones de quienes procesan los alimentos, es la de extender su vida útil y preservar la calidad de los mismos, aunado a esto la industria alimentaria es un área altamente competitiva y en constante transformación debido a la creciente demanda de los consumidores por productos alimenticios con un importante aporte nutricional, con alto contenido de compuestos funcionales y excelentes propiedades sensoriales, lo que representa un desafío para los procesadores de alimentos (Jadhav, Annapure & Deshmukh, 2021; Hernández-Hernández, Moreno-Vilet & Villanueva-Rodríguez, 2019; Moreno-Vilet, Hernández-Hernández & Villanueva-Rodríguez, 2018).

Cuando un alimento es tratado con las tecnologías convencionales como la pasteurización y la esterilización son expuestos a altas temperaturas con el fin de prolongar su vida útil, lo que sin duda reduce su carga microbiana, pero inevitablemente con pérdida de los componentes nutricionales, cambios químicos/bioquímicos, sensoriales, textura, color y/o sabor; debido principalmente al calor aplicado y/o a los cambios drásticos de temperatura, lo que resulta en una producción de alimentos de baja calidad y poca aceptación por parte del consumidor (Economou & Boziaris, 2021; Jadhav *et al.*, 2021).

La demanda del consumidor por alimentos con excelentes características sensoriales, nutricionales y microbiológicas reta a los investigadores, procesadores y tecnólogos de alimentos, a desarrollar procesos que generen productos que cumplan con estas características, lo que ha abierto un gran abanico de oportunidades para la investigación y aplicación de tratamientos no térmicos. En el campo de las tecnologías emergentes se tiene la posibilidad de aplicar las no térmicas para obtener alimentos con mayor calidad y duración, al no hacer uso de calor se pueden inactivar microorganismos con una alteración mínima en las características sensoriales y nutricionales de los mismos, si se utilizan los parámetros de procesamiento adecuados (Jadhav *et al.*, 2021; Targino *et al.*, 2021).

En este trabajo se expone una descripción general de la aplicación de las tecnologías emergentes no térmicas para el procesamiento de los alimentos, se explica el mecanismo de inactivación microbiana de cada una, sus aplicaciones más comunes y las perspectivas a futuro en el uso de este tipo de tecnologías.

## TECNOLOGÍAS EMERGENTES NO TÉRMICAS

En la búsqueda por tener alimentos inocuos y mínimamente tratados, los procesadores de alimentos se han enfocado en el uso de las tecnologías emergentes no térmicas, que además de eliminar la necesidad de incorporar aditivos químicos cubren al mismo tiempo la demanda del consumidor por alimentos con etiqueta limpia. Una tecnología emergente no térmica para elaborar alimentos se puede interpretar como un proceso que produce la inactivación o reducción de su carga microbiana

sin depender de la muerte térmica de los microorganismos (Houryieh, 2021; Hernández-Hernández *et al.*, 2019; Troy, Ojha, Kerry & Tiwari, 2016; Niemira, 2012). Las tecnologías emergentes no térmicas que se abordan en esta revisión son: altas presiones hidrostáticas, ultrasonido, pulsos eléctricos, radiación ionizante y plasma frío; con diferentes mecanismos de inactivación de los patógenos a los que también nos referimos.

### Altas presiones hidrostáticas

Las altas presiones hidrostáticas (HHP, por sus siglas en inglés), son también conocidas como altas presiones, pascalización, pasteurización hiperbárica o pasteurización en frío, es una técnica de conservación de alimentos y bebidas considerada como no térmica por su intervalo de temperatura de trabajo de 5-35 °C; es la tecnología con la mayor aplicación comercial para la inactivación o reducción de la carga microbiana usando presiones en el intervalo de 100-800 MPa (Aganovic *et al.*, 2021; Asaithambi, Singh & Singha, 2021).

El mecanismo para el funcionamiento de las HHP es muy simple y fácil de operar; está integrado por un compartimiento en el que se introduce el alimento previamente envasado (Figura 1A), posteriormente se presuriza mediante un medio transmisor, generalmente agua, durante el tiempo necesario para obtener el producto tratado en su envase final (Figura 1B) (Jadhav *et al.*, 2021; Knorr *et al.*, 2011) y evitar con ello su posterior contaminación por manipulación (Figura 1C).

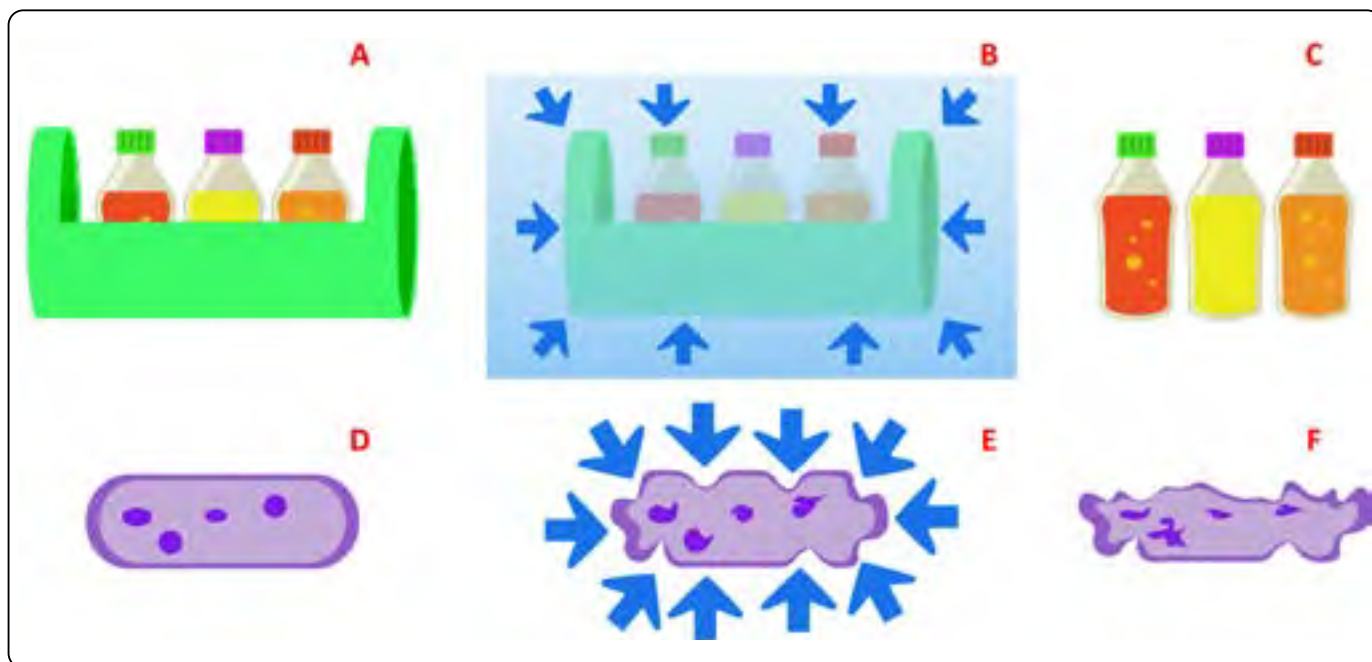
La eficacia de las HHP se rige por tres principios: el primero es el *de Le Châtelier*, en donde se establece que en cualquier fenómeno la disminución del volumen (intensifica la presión) se acompaña de una reacción química en equilibrio, transición de fase y/o cambio en la configuración molecular. El segundo principio es el isostático, en el que la transmisión de la presión es uniforme e instantánea independiente del tamaño y geometría de los alimentos, y finalmente el ordenamiento microscópico, en el que a temperatura constante, el grado de orden de las moléculas del alimento aumenta proporcionalmente a la presión aplicada (Aganovic *et al.*, 2021; Asaithambi *et al.*, 2021; Economou & Boziaris, 2021).

Las altas presiones se pueden aplicar tanto en los alimentos líquidos como en los sólidos con el fin de prolongar su vida útil al inactivar las enzimas y/o los microorganismos como las bacterias, los virus y los parásitos que afectan la salud humana, además de evitar la modificación de la matriz alimentaria (Aganovic *et al.*, 2021; Jadhav *et al.*, 2021).

### Efecto de la aplicación de las HPP en alimentos

#### Propiedades fisicoquímicas

El procesamiento con HHP tiene un efecto mínimo en la calidad de los alimentos al conservar el color, la textura, el sabor y la frescura. Los cambios fisicoquímicos son ínfimos, ya que esta tecnología no rompe los enlaces covalentes, gracias a



**Figura 1. Mecanismo de inactivación con HHP: A) Alimento en envase final, B) Producto tratado a 600 MPa, C) Producto tratado con HHP, D) Microorganismo antes del tratamiento, E) Efecto de 600 MPa en el microorganismo, F) Microorganismo después del tratamiento con HHP. Fuente propia.**

esto los compuestos funcionales, aromáticos y las vitaminas prácticamente no son dañados; por lo tanto, es capaz de conservar los alimentos de manera segura y de mantener una alta calidad en su apariencia, valor nutricional y sabor (Fam, Khosravi-Darani, Massoud & Massoud, 2021; Pinton *et al.*, 2021).

También las altas presiones hidrostáticas se han usado para inducir cambios químicos y físicos. Los principales cambios al aplicar una presión hidrostática alta se dan:

- En las propiedades físicas, como punto de fusión, solubilidad, densidad, viscosidad, etc.
- Sobre los procesos de equilibrio, como disociación de ácidos débiles, equilibrios ácido-base, ionización, etc.
- Al retrasar o acelerar la velocidad a la que se produce una reacción en particular (Martínez-Monteagudo & Balasubramaniam, 2016).

### Lípidos

Los lípidos son componentes de los alimentos muy susceptibles a la oxidación, una de las principales causas del deterioro de los alimentos durante su procesamiento y almacenamiento. El efecto de las tecnologías no térmicas sobre los lípidos es de particular interés, ya que en muchos casos se puede provocar oxidación avanzada. La aplicación de las HHP inhibe la hidrólisis de los lípidos, retarda la formación inicial de los

radicales y reduce la formación del peróxido; se ha reportado que el efecto es directamente proporcional al nivel de presión aplicado (Aganovic *et al.*, 2021; Galanakis, 2021).

### Proteínas

Dado que la estructura primaria de las proteínas consiste en una secuencia de aminoácidos unidos por enlaces covalentes, estos no se ven afectados por presiones en el rango de 150 a 200 MPa. Mientras que las estructuras cuaternarias sí se disocian por encima de los 500 MPa, con estos niveles de presión, el despliegue de las proteínas permite que los grupos sulfhidrilo o también denominados grupos tiol (-SH) estén expuestos y el número de grupos -SH desmascarados disminuya a medida que avanza el tratamiento, probablemente debido a la formación de enlaces disulfuro por oxidación, especialmente a pH alcalino, donde los aniones tiolato son más reactivos. Estas modificaciones estructurales reversibles o irreversibles en las proteínas, conducen a una disminución de la solubilidad o agregación, la desnaturalización o fragmentación de las proteínas (Ekezie *et al.*, 2018).

### Impacto en las células biológicas

Los efectos letales de las HHP sobre los microorganismos se atribuyen principalmente a la inactivación enzimática y a la ruptura de la membrana celular, sin embargo, algunos autores relacionan la muerte celular con cambios en el pH a nivel intracelular, que a su vez están relacionados con la inactivación de las enzimas que controlan la acidez y el daño

a la membrana (Priyadarshini, Rajauria, Donnell & Tiwari, 2018; Knorr *et al.*, 2011).

El mecanismo, principal, descrito para la inactivación bacteriana es la alteración de su membrana celular a través de los cambios estructurales, en sus proteínas y fosfolípidos, que aumentan su permeabilidad, condición que vulnera al microorganismo ante la presencia de los agentes antimicrobianos interrumpiendo su función celular (Asaithambi *et al.*, 2021; Ekonomou & Bozariis, 2021; Pérez-Lavalle, Carrasco & Valero, 2020). El efecto en el microorganismo con las HHP se ejemplifica en la Figura 1, donde en una primera etapa se muestra con su estructura íntegra (Figura 1D), posteriormente se representan los cambios durante la aplicación del tratamiento (Figura 1E), que altera como ya se mencionó a la membrana e irrumpe su función celular, condiciones que se ilustran en la Figura 1F donde se observa el daño.

Por otra parte, las esporas son altamente resistentes y no se inactivan con las altas presiones hidrostáticas que se utilizan en el procesamiento de los alimentos por lo que deben de aplicarse combinadas con otras tecnologías y/o calor, también se puede adicionar nisina o etanol para tener un mayor espectro de aplicación e incrementar su eficacia (Lv, Liu & Zhou, 2021).

Las ventajas de la tecnología de altas presiones son que no dependen del tamaño, la forma o la composición de los alimentos, son seguras, con un tiempo menor de aplicación, eficientes, no generan residuos y son amigables con el medio ambiente. El proceso de alimentos con las HHP también tiene sus desventajas, el costo puede ser un 700% mayor, por ejemplo, el costo por procesar el jugo de naranja se estima en 10.7 US ¢/L mientras que con la pasteurización térmica es de 1.5 US ¢/L (Hernández-Hernández *et al.*, 2019; Bevilacqua *et al.*, 2018; Priyadarshini *et al.*, 2018; Li & Farid, 2016).

Las limitaciones de esta tecnología están en función del alto costo del equipo, por lo que se requiere de una gran inversión inicial que va a depender de su configuración y capacidad de procesamiento. La falta de conocimientos prácticos sobre la interacción entre los componentes de la matriz alimentaria y los materiales de empaque limitan su aplicación cuando se cambia la naturaleza del alimento (Fam *et al.*, 2021).

Es importante mencionar que las principales variables durante el proceso son la presión, el tiempo, la temperatura, el pH del producto, la actividad del agua y el material de empaque (Fam *et al.*, 2021; Targino *et al.*, 2021; Hernández-Hernández *et al.*, 2019; Priyadarshini *et al.*, 2018).

Los primeros alimentos tratados con HHP e introducidos en el mercado fueron de empresas japonesas en 1993. Actualmente se han desarrollado una amplia gama de ellos a nivel comercial

que incluyen jugos, bebidas, frutas, verduras, alimentos listos para ser consumidos, productos a base de carne (salchichas crudas y cocidas, jamón seco), pescado, carnes, salsas, mermeladas, sopas y lácteos (Fam *et al.*, 2021; Pinton *et al.*, 2021; Priyadarshini *et al.*, 2018; Huang, Wu, Lu, Shyu & Wang, 2017; Li & Farid, 2016).

### Ultrasonido

El efecto antimicrobiano del tratamiento con ultrasonido se atribuye a la cavitación y a la formación de los radicales libres que alteran la membrana celular y producen daños en la estructura del DNA de los microorganismos (Pérez-Lavalle *et al.*, 2020).

El ultrasonido aplicado en el sector alimentario consiste en suministrar ondas acústicas con frecuencias en el rango de 20 KHz-100KHz (Bhat, Morton, Bekhit, Kumar & Bhat, 2021; Singla & Sit, 2021). La aplicación del ultrasonido a una matriz alimentaria da como resultado ondas sonoras y vibraciones mecánicas asociadas que se propagan generando un fenómeno denominado como *cavitación* (Figura 2A); este fenómeno consiste en ciclos alternados de expansión y compresión en un medio líquido. En la fase de expansión, las ondas ultrasónicas de alta intensidad crean pequeñas burbujas que se fusionan gradualmente, mientras que en la fase de compresión las burbujas alcanzan un volumen y tamaño en el que sufren un colapso violento (implosión), debido a su incapacidad para absorber la energía adicional. Las burbujas de cavitación y los micro-chorros generados durante la implosión alteran la estructura celular y los componentes funcionales de la membrana celular, lo que provoca la lisis celular, el daño severo de la pared celular y un efecto de esterilización localizado o la inducción de pequeños poros en la membrana de la pared celular. La capacidad antimicrobiana de las ondas ultrasónicas abarca a un amplio espectro de microorganismos, sin embargo, su eficacia está asociada a la frecuencia y amplitud de onda del ultrasonido (Asaithambi *et al.*, 2021; Gerschenson *et al.*, 2021; Kaavya *et al.*, 2021).

Existen dos formas de aplicación del ultrasonido en la industria alimentaria, ya sea usando un instrumento como un sonotrodo o mediante el baño de agua ultrasónico. En el caso del sonotrodo (Figura 2B) la energía acústica producida por los transductores puede ser directamente aplicada a los productos que se someten a tratamiento, mientras que en el baño de agua ultrasónico (Figura 2C) las ondas ultrasónicas de alta frecuencia se generan en el fondo del recipiente de procesamiento en el que se sumerge el alimento a ser tratado (Bhargava, Mor, Kumar & Sharanagat, 2021; Chen, Zhang & Yang, 2020).

La tecnología del ultrasonido tiene muchas aplicaciones en la industria alimentaria que incluyen homogeneización, congelación, deshidratación, extracción, emulsificación, corte, desgasificación y formación de espuma. Las ventajas del

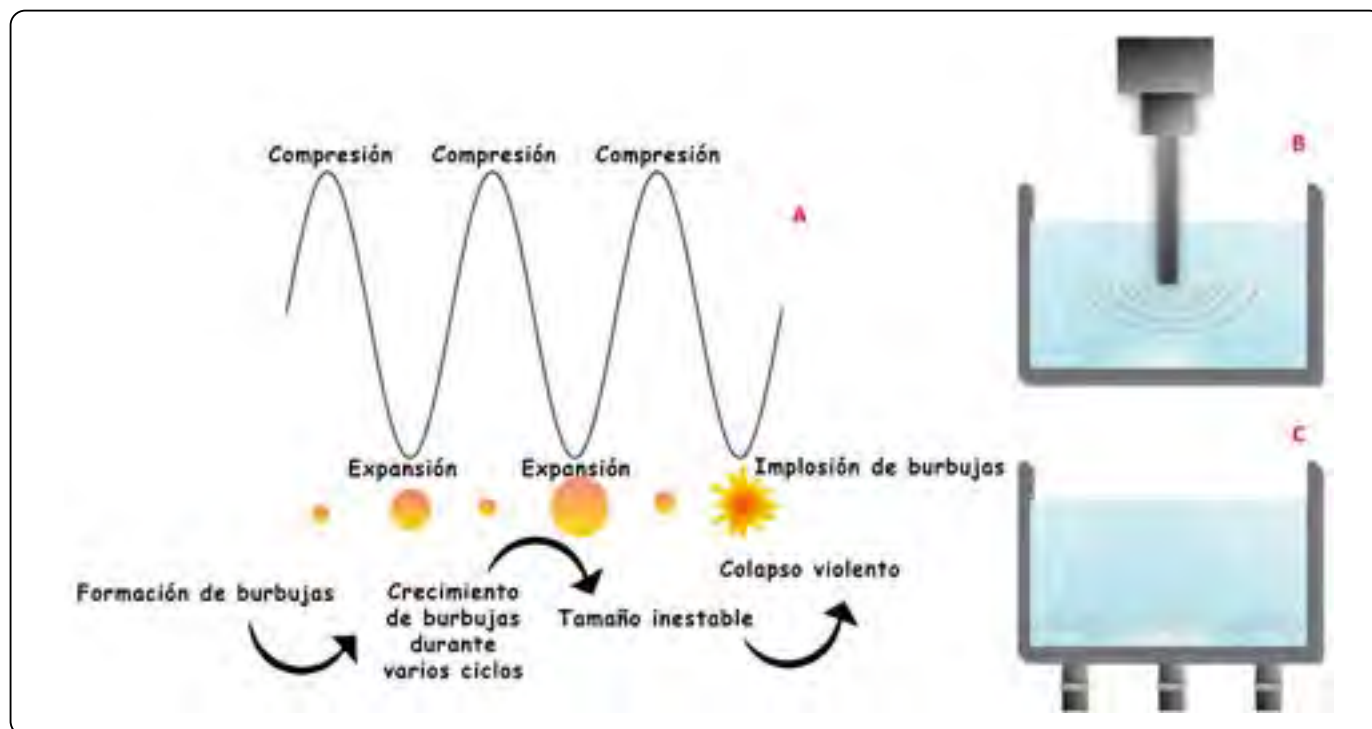


Figura 2. A) Fenómeno de cavitación durante la aplicación del ultrasonido en una matriz alimentaria, B) Sonotrodo de ultrasonido y C) baño de ultrasonido. Fuente propia.

procesamiento de alimentos con ultrasonido son la reducción del tiempo y temperaturas del proceso, mayor rendimiento así como menor consumo de energía; poca adaptación de la planta existente, operación en lotes o de manera continua y es una tecnología amigable con el ambiente (Eom *et al.*, 2021; Priyadarshini *et al.*, 2018). Dentro de sus limitaciones encontramos que la profundidad de penetración es afectada por los sólidos y el aire en el producto, hasta incidir negativamente en algunas propiedades de los alimentos, incluida la estructura, el sabor, la textura, el color o el valor nutricional si no se usan las frecuencias y condiciones de tratamiento adecuadas según el tipo de matriz alimentaria (Priyadarshini *et al.*, 2018).

### Efecto de la aplicación del ultrasonido en los alimentos

#### Lípidos

El tratamiento con ultrasonido promueve la reducción de los glóbulos de grasa, favorece la homogeneización y estabilidad cinética en las muestras que contienen lípidos, sin embargo, las temperaturas alcanzadas durante el proceso de termosonicación y los radicales libres generados dan lugar a la oxidación de los lípidos debido a la degradación térmica y la sonoquímica.

La oxidación de los lípidos ocurre por la degradación de los triglicéridos en los ácidos grasos libres, peróxido de hidrógeno y radicales libres peroxilo; posteriormente serían las amidas, alcoholes, aldehídos, hidrocarburos y cetonas. El oxígeno, el calor, el tiempo, la luz, el agua, trazas de iones metálicos actuando

como catalizadores, las metaloproteínas y las sales inorgánicas favorecen también la oxidación (Strieder, Neves, Belinato, Silva & Meireles, 2022; Galanakis, 2021; Sivaramakrishnan & Incharoensakdi, 2019; Keris-Sen, Sen, Soydemir & Gurol, 2014).

#### Proteínas

Los enlaces de hidrógeno, iónicos e interacciones hidrofóbicas que conforman a las moléculas de proteína son afectados por el fenómeno de cavitación. Aunado a esto el tratamiento con ultrasonido induce el despliegue de las moléculas de proteínas y aumenta la accesibilidad de las enzimas a los enlaces peptídicos para mejorar la interacción con el sustrato (Li *et al.*, 2021).

#### Impacto en las células biológicas

La acción bactericida del ultrasonido se reportó por primera vez en la década de 1920. El daño celular inducido por el tratamiento con ultrasonido se debe principalmente como ya se mencionó al fenómeno de cavitación, sin embargo, también influyen otros factores como el calentamiento localizado y la formación de radicales libres (Knorr *et al.*, 2011).

#### Pulsos eléctricos

Los pulsos eléctricos o campos eléctricos pulsados (PEF, por sus siglas en inglés) son una tecnología emergente no térmica estudiada en los últimos años para el procesamiento de los alimentos y consiste en la aplicación de pulsos de alto voltaje del orden de 0.1-80 kV/cm durante un período corto que va de

los micro a los milisegundos (Economou & Boziaris, 2021; Guionet *et al.*, 2021; Pérez-Lavalle *et al.*, 2020). El tratamiento con pulsos eléctricos consiste en colocar los alimentos entre dos electrodos generalmente hechos de acero inoxidable durante un breve período de tiempo para evitar el calentamiento (Figura 3A) (Jadhav *et al.*, 2021; Kaavya *et al.*, 2021; Zhang, Wang, Zeng, Han & Brennan, 2019). El mecanismo de electropermeabilización del campo eléctrico pulsado, también denominado como *electroporación*, se deriva de la aplicación de los pulsos de alto voltaje y forma poros en las membranas celulares, lo que da lugar a una pérdida de la función de barrera, contenido intracelular y de la vitalidad (Picart-Palmade, Cunault, Chevalier-lucia, Belleville & Marchesseau, 2019). La permeabilización de la membrana celular que se deriva del fenómeno de electroporación (Figura 3A) se divide en:

Irreversible (Figura 3B). Utiliza un campo eléctrico fuerte de 15 a 40 kV/cm (Hernández-Hernández *et al.*, 2019; Knorr *et al.*, 2013).

Reversible (Figura 3C). Se presenta cuando el campo eléctrico aplicado es de 0.5 a 3 kV/cm (Hernández-Hernández *et al.*, 2019; Puértolas, López, Saldaña, Álvarez & Raso, 2010).

Dentro de los factores que determinan el efecto letal en los microorganismos al usar PEF se encuentran la naturaleza de los mismos, la intensidad del campo eléctrico, el tiempo de tratamiento, la forma del pulso y la temperatura de inicio, así como los parámetros del alimento que incluyen la composición, el pH y la conductividad (Pérez-Lavalle *et al.*, 2020).

Como tecnología no térmica, los pulsos eléctricos pueden conservar los sabores y nutrientes originales de los alimentos sin los efectos secundarios habituales del procesamiento con

calor. Esta tecnología se utiliza tanto para semisólidos como líquidos, siendo esta última la más prometedora para lograr su industrialización a gran escala (Bai *et al.*, 2021; Ohshima, Tanino, Guionet, Takahashi & Takaki, 2021).

La tecnología de pulsos eléctricos se usa con éxito para prolongar la vida útil de diferentes alimentos al reducir a los microorganismos patógenos y el deterioro que estos provocan, así como para la extracción de compuestos funcionales (Arshad *et al.*, 2021; Economou & Boziaris, 2021). El proceso con campo eléctrico pulsado se ha empleado para la pasteurización de jugos de frutas, leche, yogur, sopas, carnes cocidas, huevos líquidos y otros productos alimenticios bombeables; así como la descongelación acelerada y la descontaminación de alimentos sensibles al calor (Arshad *et al.*, 2021; Morales-de la Peña, Rábago-Panduro, Soliva-Fortuny, Martín-Belloso & Welti-Chanes, 2021; Ohshima *et al.*, 2021; Pallarés, Berrada, Tolosa & Ferrer, 2021).

### Efecto de la aplicación de los PEF en los alimentos

#### Lípidos

El tratamiento con PEF causa daños en las membranas celulares, al promover el inicio de la oxidación de los lípidos en los productos cárnicos (Arroyo *et al.*, 2015; Cropotova *et al.*, 2021).

#### Proteínas

El tratamiento mediante PEF ha mostrado su gran capacidad en el procesamiento de los alimentos a base de proteínas (leche, leche de soya y huevo) al inactivar la mayoría de las enzimas endógenas e inducir la actividad biológica de los péptidos (capacidad antioxidante). Las proteínas son ingredientes importantes en los alimentos, tienen propiedades nutricionales, funcionales y de textura, los PEF facilitan su extracción, cambian la actividad catalítica de las enzimas y las propiedades

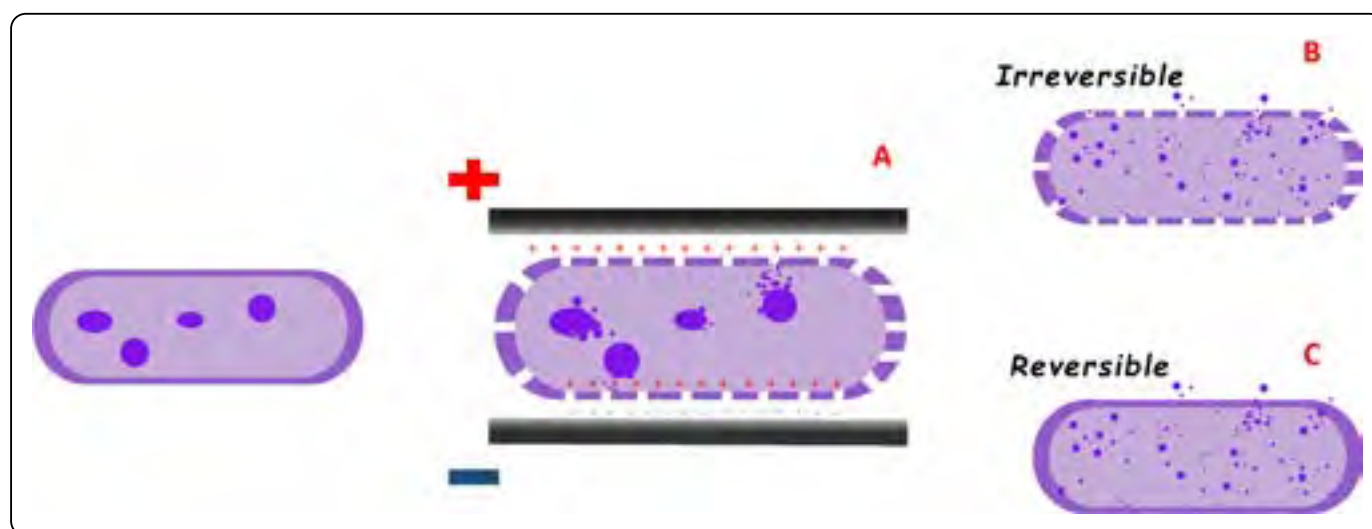


Figura 3. Fenómeno de electroporación por el tratamiento con pulsos eléctricos. A) sin tratamiento, B) electroporación, C) permeabilización irreversible y D) permeabilización reversible. Fuente propia.

fisiológicas, bioactivas y nutricionales de las proteínas (Zhang *et al.*, 2021).

El tratamiento con PEF influye directamente en las estructuras secundarias de las proteínas y reduce el contenido de su  $\alpha$ -hélice con pérdida de las  $\beta$ -láminas en muchas de ellas (Vanga, Wang, Jayaram & Raghavan, 2021). Más reacciones como su polarización, la disociación de las subunidades de proteínas no unidas covalentemente e involucradas en las estructuras cuaternarias, cambios en los que quedan expuestos los grupos aminoácidos hidrofóbicos o sulfhidrilo, atracción de estructuras polarizadas por fuerzas electrostáticas, e interacciones hidrofóbicas o enlaces no covalentes que forman agregados (Knorr *et al.*, 2011).

### Impacto en las células biológicas

El efecto de los PEF en las células biológicas incluye el daño a la membrana y la inactivación de los microorganismos, sin embargo, la ruptura eléctrica de las membranas es reparable bajo ciertas condiciones, estas reparaciones dependen de la intensidad del tratamiento, el pH del medio de tratamiento y del microorganismo (Knorr *et al.*, 2011).

Las ventajas son que los alimentos conservan colores, sabores y nutrientes, no hay evidencia de toxicidad y el tiempo de tratamiento es relativamente corto en comparación con las tecnologías convencionales. Las desventajas son que esta tecnología no tiene efecto sobre las enzimas y las esporas, sólo combinándola con calor, es difícil de usar con sistemas

que conduzcan la electricidad, únicamente apto para líquidos o partículas en solución, su regulación sanitaria no está resuelta y la presencia de burbujas puede provocar un tratamiento no uniforme. El costo por procesar con pulsos eléctricos es de 3.7 US  $\phi$ /L para el jugo de naranja, 2.5 US  $\phi$ /L los jugos de frutas y 52.31 US  $\phi$ /L la leche. El tratamiento con PEF se percibe como una tecnología económica y respetuosa con el medio ambiente para inactivar microbios y mejorar la transferencia de masa en los productos alimenticios (Hernández-Hernández *et al.*, 2019; Shahbaz, Kim, Kim & Park, 2018; Li & Farid, 2016; Elez-Martínez, Sobrino-López, Soliva-Fortuny & Martín-Belloso, 2012).

### Radiación ionizante

Al igual que las tecnologías anteriores, radiar los alimentos es una tecnología no térmica, en la cual se les expone a una energía ionizante para la inactivación de los patógenos. La radiación puede provenir de tres fuentes diferentes: rayos gamma, haces de electrones y rayos X, en el caso particular de los alimentos, la fuente que se utiliza en un 70%, es el  $^{60}\text{Co}$ . Esta tecnología es segura si la radiación proviene de una de las tres fuentes aprobadas por la FDA ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  y Rayos X 5MeV) y por la comisión del *Codex Alimentario* en el año 2003, adoptada por más de 55 países incluyendo E.U.A., Japón y China (Priyadarshini *et al.*, 2018); la dosis de radiación aprobada para el procesamiento de alimentos varía entre 0.5-30 kGy (Jadhav *et al.*, 2021; Ravindran & Jaiswal, 2019; Priyadarshini *et al.*, 2018).

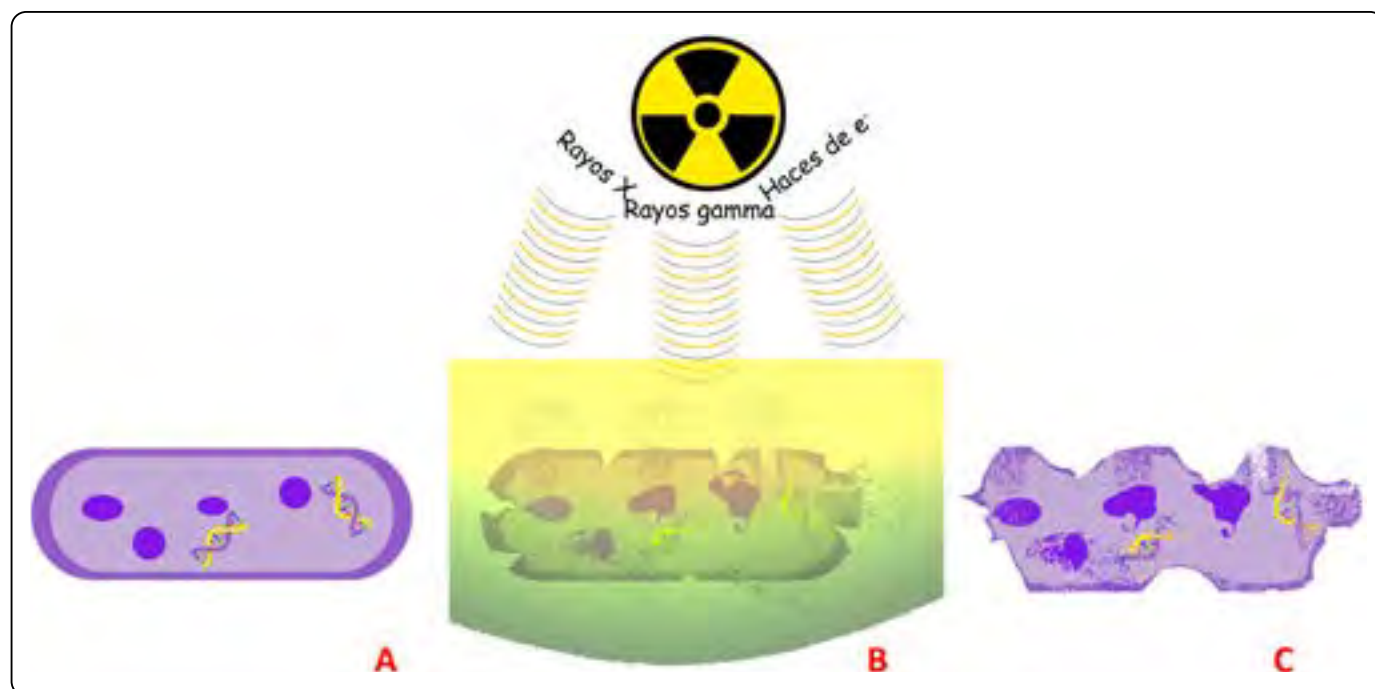


Figura 4. Inactivación de los microorganismos con radiación ionizante. A) microorganismo antes del tratamiento, B) microorganismo durante el tratamiento y C) microorganismo después del tratamiento de irradiación. Fuente propia.

El mecanismo del efecto letal por la aplicación de la radiación ionizante incluye el daño al DNA bacteriano y la producción de moléculas activas como radicales hidroxilo ( $\text{OH}^\cdot$ ) e hidrógeno ( $\text{H}^\cdot$ ) así como electrones que conducen a la lisis celular (Zhang *et al.*, 2019). El efecto de la aplicación de la radiación para la conservación de los alimentos se ejemplifica en la Figura 4, en la que se ve a un microorganismo sin alteraciones (Figura 4A) que es sometido a radiación ionizante (Figura 4B), posterior al ser irradiado presenta lisis celular y daño al DNA (Figura 4C).

La efectividad de esta tecnología está determinada por la fuente de radiación ionizante, las características de la matriz del alimento, el contenido de humedad, la presencia o ausencia de oxígeno, la dosis absorbida, la densidad y grosor del alimento.

Para la radiación las aplicaciones incluyen la pasteurización, esterilización, senescencia retardada, desinfestación, inactivación de esporas y bacterias patógenas, sin afectar significativamente los atributos sensoriales o nutricionales de la mayoría de los alimentos. El tratamiento cuesta alrededor de 60 ¢/kg para dosis de 150 a 400 Gy y se ha utilizado para la conservación de frutas, verduras, hierbas, especias, carne y pescado; esta tecnología es adecuada para alimentos crudos, secos o procesados. Las ventajas son: menor tiempo de procesamiento, excelente penetración en los alimentos (apta para producción a gran escala y alimentos secos), ecológica y de bajo coste energético, modificación mínima en el sabor, color, nutrientes y atributos de calidad en los alimentos, así como pérdidas insignificantes o sutiles de compuestos bioactivos. Por otra parte las desventajas son la escasa comprensión del consumidor, alta inversión inicial, los riesgos implícitos de usar radiación y finalmente, si las condiciones del proceso son excesivas se producen condiciones indeseables en la calidad sensorial y nutritiva del alimento (Jadhav *et al.*, 2021; Hernández-Hernández *et al.*, 2019; Ravindran & Jaiswal, 2019; Shahbaz, Akram & Ahn, 2016).

### **Efecto de la aplicación de la radiación ionizante en los alimentos**

#### **Lípidos**

Los lípidos se encuentran entre los componentes alimentarios más susceptibles a la radiación ionizante, que induce a la autooxidación. El procesamiento genera radicales libres y propicia la oxidación de los ácidos grasos insaturados. Al mejorar las reacciones de los radicales libres, la radiación puede provocar cambios de color, oxidación de los lípidos y generación de olores en los alimentos, con una respuesta negativa de los consumidores por el deterioro de la calidad y un sabor rancio (Blackshaw *et al.*, 2021; Galanakis, 2021; Cheng *et al.*, 2011).

La oxidación de los lípidos, también se da por medio de los radicales libres generados por la radiólisis del agua, los

radicales hidroxilo ( $\text{OH}^\cdot$ ) y el ion hidrógeno ( $\text{H}^\cdot$ ) que atacan a los componentes de los alimentos (proteínas, aminoácidos, lípidos, etc.) y conducen a una mayor tasa de oxidación que se incrementa durante la etapa de almacenamiento (Cheng *et al.*, 2011).

#### **Proteínas**

La radiación ionizante genera daño a las estructuras de las proteínas debido a la ruptura de los aminoácidos que contienen azufre y reducción de las vitaminas C y E. Esta tecnología como ya se ha mencionado es segura para su uso en alimentos incluso en dosis altas (>10 kGy); sin embargo, pueden ocasionar cambios en la calidad sensorial del alimento (Blackshaw *et al.*, 2021).

#### **Impacto en las células biológicas**

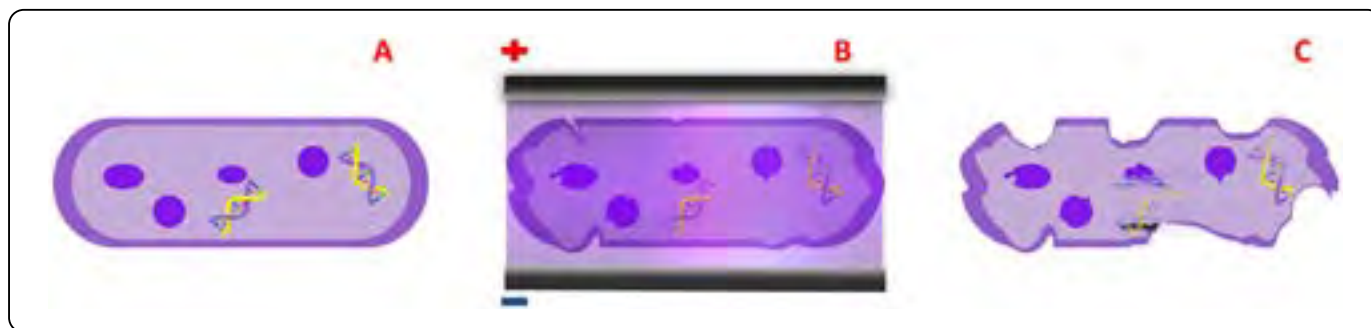
La radiación ionizante tiene efectos directos e indirectos sobre los patógenos. Los directos incluyen un daño a los componentes celulares como los carbohidratos, el DNA, el RNA y los lípidos; mientras que indirectamente, los radicales libres y las especies reactivas como los iones de hidrógeno ( $\text{H}^\cdot$ ) o los radicales hidroxilo ( $\text{OH}^\cdot$ ) de la radiólisis del agua reaccionan con el contenido celular destruyendo parte del DNA de los microorganismos (Blackshaw *et al.*, 2021, 2022; Bisht *et al.*, 2021).

#### **Plasma frío**

La tecnología de plasma frío es la de más reciente desarrollo entre las emergentes no térmicas y prácticamente se encuentra en etapa de investigación. El plasma es un gas ionizado con una gran cantidad de electrones, iones, fotones y radicales libres, así como átomos y moléculas de gas en estado fundamental o excitado (Figura 5). La ionización del gas se logra por calentamiento o campo eléctrico, siendo el segundo el método más usado en los alimentos (Kaavya *et al.*, 2021; Niemira, 2012).

En esta tecnología el término “frío” no se refiere a temperaturas de refrigeración o congelación, las fuentes de plasma (oxígeno, nitrógeno y helio) operan alrededor de los 60°C y se consideran como plasma frío en comparación con otras fuentes de generación de plasmas (600 °C - 800 °C) (Niemira, 2012). Los alimentos tratados con tecnología de plasma frío muestran una reducción en su carga microbiana debido a que los microorganismos están expuestos al bombardeo de electrones, iones, fotones y radicales libres fuertemente cargadas lo que genera daños en la membrana celular y el DNA. Esta tecnología permite trabajar en condiciones secas, lo que supone una ventaja frente a las tecnologías de HHP, pulsos eléctricos y ultrasonido, que requieren de un medio líquido para su aplicación; se han reportado efectos mínimos sobre la calidad de los alimentos y la apariencia del producto, por lo que esta tecnología es efectiva para procesar productos sensibles a la temperatura. Otra ventaja de esta tecnología es la poca energía que consume y no genera residuos tóxicos (Jadhav *et al.*, 2021; Kaavya *et al.*, 2021).





**Figura 5. Inactivación de los microorganismos con plasma frío A) microorganismo sin tratamiento, B) microorganismo durante el tratamiento y C) microorganismo después del tratamiento con plasma frío. Fuente propia.**

Actualmente no existe algún instrumento comercial disponible para la desinfección de los productos alimenticios y/o materiales de embalaje. Una de las desventajas del plasma frío es que se encuentra en la etapa de investigación y todavía no existe la posibilidad de escalar a nivel de planta piloto, además se desconoce el mecanismo de inactivación de las esporas y finalmente no se ha establecido su regulación sanitaria.

Las aplicaciones del plasma frío en el campo de los alimentos incluyen la desinfección de superficies de productos sólidos y líquidos como leche en polvo, carne, aves, pescado, hierbas, semillas germinadas, granos, especias y productos frescos (Gavahian & Khaneghah, 2019; Hernández-Hernández *et al.*, 2019; Misra, Pankaj, Segat & Ishikawa, 2016; Misra, Yopez, Xu & Keener, 2019), también se pueden tratar con éxito los envases con formas irregulares, como las botellas, en comparación con las tecnologías como la luz ultravioleta o pulsada donde se producen sombras (Priyadarshini *et al.*, 2018).

### Efecto de la aplicación de plasma frío en los alimentos

#### Lípidos

Se ha reportado que el plasma frío además de descontaminar los alimentos promueve los procesos oxidativos en algunos sistemas alimentarios (Galanakis, 2021). Genera especies reactivas de oxígeno como radicales hidroxilo, peróxido de hidrógeno y aniones oxidantes que participan en la descontaminación microbiana; sin embargo, algunas de las especies reactivas, particularmente los radicales libres inician el proceso de oxidación de los lípidos al extraer los iones de hidrógeno de las moléculas de los mismos (Gavahian, Chu, Mousavi Khaneghah, Barba & Misra, 2018). Sin embargo, al ser una tecnología en desarrollo continuo se requiere proseguir con la investigación para tener una buena comprensión de sus efectos sobre los parámetros críticos de seguridad y calidad como un requisito previo para su comercialización.

#### Proteínas

La aplicación de plasma frío influye en la biofuncionalidad de las proteínas de manera directa o indirecta. Es decir, los cambios en sus grupos funcionales son el resultado directo de

las especies reactivas o indirectamente a través de constituyentes adyacentes activados.

Los métodos convencionales han sido utilizados para mejorar la funcionalidad de las biomoléculas como las proteínas con el fin de ampliar su espectro de aplicaciones, sin embargo, las manipulaciones con estos métodos están acompañadas de un deterioro del valor nutricional de las proteínas por lo que el plasma frío es una buena alternativa para lograr alteraciones en los constituyentes de los alimentos, sus estructuras y propiedades preservando su valor nutricional (Sharma & Singh, 2020).

La interacción del plasma frío con las proteínas conduce a la dimerización, oxidación, desaminación, nitración, sulfoxidación, deshidrogenación y/o hidroxilación de los aminoácidos; se ha demostrado que el oxígeno atómico desempeña un papel dominante en las reacciones de destrucción y degradación de las proteínas (Mollakhalili-Meybodi, Yousefi, Nematollahi & Khorshidian, 2021; Knorr *et al.*, 2011).

#### Impacto en las células biológicas

La actividad antimicrobiana del plasma frío contra las bacterias gram negativas, gram positivas, levaduras y hongos, formadores de biopelículas y endosporas se ha demostrado en varios estudios (Asaithambi *et al.*, 2021; Ganesan, Tiwari, Ezhilarasi & Rajauria, 2021; Muro-Fraguas *et al.*, 2020; Ukuku, Niemira & Ukanalis, 2019; Niemira, 2012).

Las membranas celulares de los microorganismos se perforan después del tratamiento con plasma, adicionalmente los radicales libres ( $\text{OH}^\cdot$  u  $\text{NO}^\cdot$ ) interaccionan con el contenido celular ocasionando su inactivación (Gavahian *et al.*, 2018; Knorr *et al.*, 2011).

### PERSPECTIVAS DE LAS TECNOLOGÍAS EMERGENTES NO TÉRMICAS

Es evidente que los niveles de madurez de las tecnologías emergentes son diferentes; las Altas presiones hidrostáticas se encuentran en la etapa de comercialización por su aplicación,

como en el caso del aguacate en varias presentaciones que van desde la pulpa, las rebanadas, los trozos, el guacamole, etc.; en el mercado también se pueden encontrar diferentes jugos, alimentos disponibles para ser ingeridos al momento y para bebés. Los Pulsos eléctricos también están en etapa de comercialización, y cuentan con varias marcas que distribuyen jugos tratados con esta tecnología; por otra parte, el Ultrasonido y la Radiación ionizante tienen varias aplicaciones a nivel industrial, como desespumante y homogeneizador, desinfectación de varios productos destacando las especias y polvos; sin embargo, el Plasma frío todavía se encuentra en la etapa de investigación a nivel laboratorio.

La Tabla I condensa las aplicaciones actuales y las que se encuentran en etapa de investigación de cada una de las tecnologías abordadas en este artículo, de igual manera se presentan las perspectivas y áreas de oportunidad para continuar con la investigación y desarrollo. Aunque algunas se encuentran en la fase de comercialización, todavía existen aspectos que necesitan ser investigados y probar su viabilidad para sustituir a las tecnologías convencionales, por ejemplo, tener un pleno control de las variables asociadas a la operación del proceso; otro factor importante que requiere atención es

la falta de una normatividad sobre los productos sometidos a tratamiento, por lo que el primer paso sería la validación de los métodos y procesos usados. Si bien, los productos tratados mediante radiación ionizante fueron declarados seguros desde 2003 por el Codex Alimentario y aceptado por 55 países, la normativa es diferente en cada uno de ellos por lo que sería conveniente unificar los criterios. Una limitante más para el desarrollo de estas tecnologías a nivel industrial son los altos costos de inversión y la estrecha gama de equipos disponibles, problema que puede superarse redefiniendo el diseño de los equipos para su uso generalizado esto a su vez coadyuva a que su costo de producción y operación disminuyan. Además, persiste una ausencia de información de las condiciones de los procesos de producción, de los beneficios y ventajas al ser utilizadas, situación que no contribuye a la diversificación de sus aplicaciones. La aceptación por parte del consumidor de los productos alimenticios tratados con tecnologías emergentes puede incrementarse al proporcionar la información correcta y oportuna sobre las ventajas que ofrecen estas tecnologías. Un camino para promover la aceptación por parte de los consumidores de este tipo de alimentos es con información en el empaque resaltando las ventajas de estos productos sobre los procesados térmicamente.

**Tabla I. Aplicaciones actuales y en desarrollo, así como las perspectivas de las tecnologías emergentes no térmicas.**

Tecnología	Tipo de alimento	Aplicaciones actuales	Aplicaciones en desarrollo	Perspectivas
HHP	<ul style="list-style-type: none"> <li>Líquido</li> <li>Sólido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conservación de los alimentos.</li> <li>Eliminación de los microorganismos.</li> <li>Incremento de vida útil.</li> <li>Modificación de la textura.</li> <li>Incremento de la digestibilidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Recuperación de los compuestos bioactivos.</li> <li>Aumento de la biodisponibilidad de los micronutrientes y los fitoquímicos.</li> <li>Reducir el potencial alergénico</li> <li>Preservar lípidos saludables.</li> <li>Reducir el consumo de la sal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Procesamiento de maquila por otros usuarios para disminuir los costos de inversión inicial.</li> <li>Promover el uso generalizado para reducir los costos de producción.</li> <li>Estudio de los efectos en materiales de embalaje.</li> <li>Estudio de la posible transferencia de masa de los materiales de empaque a los alimentos.</li> </ul>
Ultrasonido	<ul style="list-style-type: none"> <li>Líquido</li> <li>Sólido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Extracción de compuestos de interés.</li> <li>Método antiespumante.</li> <li>Emulsificación.</li> <li>Facilitar la transferencia de masa.</li> <li>Cambios en la estructura y propiedades.</li> <li>Homogeneización.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Extracción</li> <li>Estudio de la sinergia de esta tecnología con otras: aceites esenciales, microondas, enzimas, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción de los costos de mantenimiento.</li> <li>Investigación a nivel industrial de los aspectos de seguridad y posibles efectos adversos.</li> <li>Estudio de la eficiencia energética para su industrialización.</li> <li>Investigación de la implementación a escala industrial.</li> </ul>

Tabla I. Aplicaciones actuales y en desarrollo, así como las perspectivas de las tecnologías emergentes no térmicas (*continuación*).

Tecnología	Tipo de alimento	Aplicaciones actuales	Aplicaciones en desarrollo	Perspectivas
PEF	<ul style="list-style-type: none"> <li>Líquido</li> <li>Semilíquido</li> <li>Sólido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pasteurización.</li> <li>Extracción de los compuestos bioactivos.</li> <li>Funcionalización de las moléculas.</li> <li>Transición de equipos de nivel laboratorio a planta piloto y escala industrial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Combinación con otras tecnologías.</li> <li>Funcionalización de las biomacromoléculas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reducción de los costos de los equipos.</li> <li>Comprensión más profunda del mecanismo y del modelo de transferencia de masa.</li> </ul>
Radiación ionizante	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sólido</li> <li>Líquido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desinfestación.</li> <li>Proceso de senescencia y maduración retardada.</li> <li>Inactivación de los microorganismos y las esporas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudio de los productos radiolíticos.</li> <li>Estudios de funcionalidad.</li> <li>Determinación de inocuidad a escala comercial.</li> <li>Extracción de compuestos bioactivos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Promover la aceptación por parte del consumidor.</li> <li>Efecto de los productos de radiólisis.</li> <li>Reducir los efectos de la radiación en los lípidos.</li> <li>Estudios de equivalencia de dosis, etiquetado, estándares.</li> <li>Armonización de la legislación.</li> </ul>
Plasma frío	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sólido</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desinfección de las superficies en alimentos con superficie compleja.</li> <li>Esterilización.</li> <li>Inactivación de las enzimas.</li> <li>Modificación de las propiedades hidrofílicas/hidrofóbicas.</li> <li>Grabado o la deposición de películas delgadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Efecto del tratamiento de plasma en frío sobre las propiedades sensoriales, fisicoquímicas y nutricionales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estudio de escalamiento</li> <li>Estudio de las interacciones plasma-matriz alimentaria.</li> <li>Estudios de reproducibilidad de los resultados.</li> <li>Estudios de inocuidad.</li> </ul>

Por otra parte, la industria alimentaria es una de las que más agua consume en la elaboración de los alimentos, limpieza y transporte, así como en intercambiadores de calor; se estima que aproximadamente el 25% del consumo de este líquido en todo el mundo es para esta industria, aunado a esto es una de las mayores generadoras de desechos y de un gran volumen de aguas residuales (Picart-Palmade *et al.*, 2019). Por lo anterior, las tecnologías emergentes han cobrado importancia como alternativas sostenibles, siendo necesario que reduzcan el consumo de energía y agua, así como la generación de desechos y aguas residuales, aumentando el reciclaje de residuos sólidos. Sin embargo, es necesario ampliar el estudio de los impactos ambientales, económicos y sociales generados con su implementación para definir sus capacidades y límites, ya que el desafío en un futuro cercano será garantizar la disponibilidad de suficientes alimentos inocuos, nutritivos y apetecibles para la población en rápida expansión.

### CONCLUSIONES

Con las tecnologías emergentes no térmicas se obtienen alimentos libres de aditivos con una mayor calidad sensorial y nutricional, los tiempos de procesamiento son cortos con un menor consumo de energía respecto a las tecnologías convencionales. Sin embargo, aún se requiere una mayor investigación en lo relacionado a su aplicación, los fenómenos de transporte y también con las interacciones en la matriz alimentaria para desarrollar nuevos equipos que faciliten su escalamiento a nivel industrial, aumentando el número de usuarios y disminuyendo el costo de procesamiento, así como establecer las bases suficientes para una legislación que regule su aplicación e impacto en el medio ambiente.

## REFERENCIAS

- Aganovic, K., Hertel, C., Vogel, R. F., Johne, R., Schlüter, O., Schwarzenbolz, U., Jäger, H., Holzhauser, T., Bergmair, J., Roth, A., Sevenich, R., Bandick, N., Kulling, S. E., Knorr, D., Engel, K. K.-H. & Heinz, V. (2021). Aspects of high hydrostatic pressure food processing: Perspectives on technology and food safety. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **20**(April), 1–42. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12763>
- Arroyo, C., Eslami, S., Brunton, N. P., Arimi, J. M., Noci, F. & Lyng, J. G. (2015). An assessment of the impact of pulsed electric fields processing factors on oxidation, color, texture, and sensory attributes of turkey breast meat. *Journal Name Poultry Science*, **94**(5), 1088–1095. <https://doi.org/10.3382/ps/pev097>
- Arshad, R. N., Abdul-Malek, Z., Roobab, U., Munir, M. A., Naderipour, A., Qureshi, M. I., El-Din Bekhit, A., Liu, Z. W. & Aadil, R. M. (2021). Pulsed electric field: A potential alternative towards a sustainable food processing. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 111, pp. 43–54). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.041>
- Asaithambi, N., Singh, S. K. & Singha, P. (2021). Current status of non-thermal processing of probiotic foods: A review. In *Journal of Food Engineering* (Vol. 303, p. 110567). <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110567>
- Bai, T.-G., Zhang, L., Qian, J.-Y., Jiang, W., Wu, M., Rao, S.-Q., Li, Q., Zhang, C. & Wu, C. (2021). Pulsed electric field pretreatment modifying digestion, texture, structure and flavor of rice. *LWT*, **138**, 110650. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110650>
- Bevilacqua, A., Petrucci, L., Perricone, M., Speranza, B., Campaniello, D., Sinigaglia, M. & Corbo, M. R. (2018). Nonthermal Technologies for Fruit and Vegetable Juices and Beverages: Overview and Advances. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **17**(1), 2–62. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12299>
- Bhargava, N., Mor, R. S., Kumar, K. & Sharanagat, V. S. (2021). Advances in application of ultrasound in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, **70**, 105293. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105293>
- Bhat, Z. F., Morton, J. D., Bekhit, A. E. D. A., Kumar, S. & Bhat, H. F. (2021). Emerging processing technologies for improved digestibility of muscle proteins. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 110, pp. 226–239). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.010>
- Bisht, B., Bhatnagar, P., Gururani, P., Kumar, V., Tomar, M. S., Sinhmar, R., Rathi, N. & Kumar, S. (2021). Food irradiation: Effect of ionizing and non-ionizing radiations on preservation of fruits and vegetables— a review. *Trends in Food Science and Technology*, **114**(May), 372–385. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.002>
- Blackshaw, K., Wu, J., Proschogo, N., Davies, J., Oldfield, D., Schindeler, A., Banati, R. B., Dehghani, F. & Valtchev, P. (2022). The effect of thermal pasteurization, freeze-drying, and gamma irradiation on donor human milk. *Food Chemistry*, **373**(PB), 131402. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131402>
- Blackshaw, K., Wu, J., Valtchev, P., Lau, E., Banati, R. B., Dehghani, F. & Schindeler, A. (2021). The effects of thermal pasteurisation, freeze-drying, and gamma-irradiation on the antibacterial properties of donor human milk. *Foods*, **10**(9), 1–15. <https://doi.org/10.3390/foods10092077>
- Chen, F., Zhang, M. & Yang, C. H. (2020). Application of ultrasound technology in processing of ready-to-eat fresh food: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, **63**. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104953>
- Cheng, A., Wan, F., Xu, T., Du, F., Wang, W. & Zhu, Q. (2011). Effect of irradiation and storage time on lipid oxidation of chilled pork. *Radiation Physics and Chemistry*, **80**(3), 475–480. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2010.10.003>
- Cropotova, J., Tappi, S., Genovese, J., Rocculi, P., Dalla Rosa, M. & Rustad, T. (2021). The combined effect of pulsed electric field treatment and brine salting on changes in the oxidative stability of lipids and proteins and color characteristics of sea bass (*Dicentrarchus labrax*). *Heliyon*, **7**(1), e05947. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05947>
- Ekezie, F. C., Cheng, J. H., Sun, D. W., Chizoba Ekezie, F. G., Cheng, J. H. & Sun, D. W. (2018). Effects of nonthermal food processing technologies on food allergens: A review of recent research advances. *Trends in Food Science and Technology*, **74**(October 2017), 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.01.007>
- Ekonomou, S. I. & Boziaris, I. S. (2021). Non-thermal methods for ensuring the microbiological quality and safety of seafood. *Applied Sciences*, **11**(2), 1–27. <https://doi.org/10.3390/app11020833>
- Elez-Martínez, P., Sobrino-López, Á., Soliva-Fortuny, R. & Martín-Belloso, O. (2012). Pulsed Electric Field Processing of Fluid Foods. In B. Tiwari & V. Valdramidis (Eds.), *Novel Thermal And Non-Thermal Technologies For Fluid Foodshnologies For Fluid Foods* (pp. 63–108). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381470-8.00004-9>
- Eom, S. J., Zu, H. D., Lee, J., Kang, M.-C. C., Park, J., Song, K.-M.M. & Lee, N. H. (2021). Development of an ultrasonic system for industrial extraction of unheated sesame oil cake. *Food Chemistry*, **354**, 129582. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129582>
- Fam, S. N., Khosravi-Darani, K., Massoud, R. & Massoud, A. (2021). High-pressure processing in food. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, **11**(4), 11553–11561. <https://doi.org/10.33263/BRIAC114.1155311561>
- Galanakis, C. M. (2021). Functionality of food components and emerging technologies. *Foods*, **10**(1), 1–26. <https://doi.org/10.3390/foods10010128>
- Ganesan, A. R., Tiwari, U., Ezhilarasi, P. N. & Rajauria, G. (2021). Application of cold plasma on food matrices: A review on current and future prospects. *Journal of Food*

- Processing and Preservation*, **45**(1), e15070. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/jfpp.15070>
- Gavahian, M., Chu, Y. H., Mousavi Khaneghah, A., Barba, F. J. & Misra, N. N. (2018). A critical analysis of the cold plasma induced lipid oxidation in foods. *Trends in Food Science and Technology*, **77**(April), 32–41. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.04.009>
- Gavahian, M. & Khaneghah, A. M. (2019). Cold plasma as a tool for the elimination of food contaminants : Recent advances and future trends. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1584600>
- Gerschenson, L. N., Fissore, E. N., Rojas, A. M., Idrovo Encalada, A. M., Zukowski, E. F. & Higuera Coelho, R. A. (2021). Pectins obtained by ultrasound from agroindustrial by-products. *Food Hydrocolloids*, **118**, 106799. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106799>
- Guionet, A., Fujiwara, T., Sato, H., Takahashi, K., Takaki, K., Matsui, M., Tanino, T. & Ohshima, T. (2021). Pulsed electric fields act on tryptophan to inactivate  $\alpha$ -amylase. *Journal of Electrostatics*, **112**, 103597. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jelstat.2021.103597>
- Hernández-Hernández, H. M., Moreno-Vilet, L. & Villanueva-Rodríguez, S. J. (2019). Current status of emerging food processing technologies in Latin America: Novel non-thermal processing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, **58**(October), 102233. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102233>
- Huang, H.-W., Wu, S.-J., Lu, J.-K., Shyu, Y.-T. & Wang, C.-Y. (2017). Current status and future trends of high-pressure processing in food industry. *Food Control*, **72**(12), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.07.019>
- Jadhav, H. B., Annature, U. S. & Deshmukh, R. R. (2021). Non-thermal Technologies for Food Processing. *Frontiers in Nutrition*, **8**, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.657090>
- Kaavya, R., Pandiselvam, R., Abdullah, S., Sruthi, N. U., Jayanath, Y., Ashokkumar, C., Chandra Khanashyam, A., Kothakota, A. & Ramesh, S. V. (2021). Emerging non-thermal technologies for decontamination of *Salmonella* in food. *Trends in Food Science and Technology*, **112**(April), 400–418. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.011>
- Keris-Sen, U. D., Sen, U., Soydemir, G. & Gurol, M. D. (2014). An investigation of ultrasound effect on microalgal cell integrity and lipid extraction efficiency. *Bioresource Technology*, **152**, 407–413. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.018>
- Khouryieh, H. A. (2021). Novel and emerging technologies used by the U.S. food processing industry. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, **67**(September 2020), 102559. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102559>
- Knorr, D., Froehling, A., Jaeger, H., Reineke, K., Schlueter, O. & Schoessler, K. (2011). Emerging technologies in food processing. *Annual Review of Food Science and Technology*, **2**, 203–235. <https://doi.org/10.1146/annurev.food.102308.124129>
- Knorr, D., Froehling, A., Jaeger, H., Reineke, K., Schlueter, O. & Schoessler, K. (2013). Emerging Technologies for Targeted Food Processing. In S. Yanniotis, P. Taoukis, N. G. Stoforos, & V. T. Karathanos (Eds.), *Advances in Food Process Engineering Research and Applications* (pp. 341–374). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7906-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7906-2_17)
- Li, X. & Farid, M. (2016). A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies. *Journal of Food Engineering*, **182**, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.02.026>
- Li, H., Hu, Y., Zhao, X., Wan, W., Du, X., Kong, B. & Xia, X. (2021). Effects of different ultrasound powers on the structure and stability of protein from sea cucumber gonad. *LWT*, **137**, 110403. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110403>
- Lv, R., Liu, D. & Zhou, J. (2021). Bacterial spore inactivation by non-thermal technologies: resistance and inactivation mechanisms. In *Current Opinion in Food Science* (Vol. 42, pp. 31–36). <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.12.014>
- Martínez-Monteaudo, S. I. & Balasubramaniam, V. M. (2016). Fundamentals and Applications of High-Pressure Processing Technology. In V. M. Balasubramaniam, G. V Barbosa-Cánovas, & H. L. M. Lelieveld (Eds.), *High Pressure Processing of Food: Principles, Technology and Applications* (pp. 3–17). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3234-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3234-4_1)
- Misra, N. N., Pankaj, S. K., Segat, A. & Ishikawa, K. (2016). Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. *Trends in Food Science and Technology*, **55**, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.001>
- Misra, N. N., Yopez, X., Xu, L. & Keener, K. (2019). In-package cold plasma technologies. *Journal of Food Engineering*, **244**, 21–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.09.019>
- Mollakhalili-Meybodi, N., Yousefi, M., Nematollahi, A. & Khorshidian, N. (2021). Effect of atmospheric cold plasma treatment on technological and nutrition functionality of protein in foods. *European Food Research and Technology*, **0123456789**. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03750-w>
- Morales-de la Peña, M., Rábago-Panduro, L. M., Soliva-Fortuny, R., Martín-Belloso, O. & Welti-Chanes, J. (2021). Pulsed Electric Fields Technology for Healthy Food Products. *Food Engineering Reviews*, **13**(3), 509–523. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09277-2>
- Moreno-Vilet, L., Hernández-Hernández, H. M. & Villanueva-Rodríguez, S. J. (2018). Current status of emerging food processing technologies in Latin America: Novel thermal processing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, **50**(February), 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.06.013>
- Muro-Fraguas, I., Sainz-García, A., Fernández Gómez, P., López,

- M. M., Múgica-Vidal, R., Sainz-García, E., Toledano, P., Sáenz, Y., López, M. M., González-Raurich, M., Prieto, M., Alvarez-Ordóñez, A., González-Marcos, A. & Alba-Elías, F. (2020). Atmospheric pressure cold plasma anti-biofilm coatings for 3D printed food tools. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, **64**, 102404. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102404>
- Niemira, B. A. (2012). Cold plasma decontamination of foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, **3(1)**, 125–142. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-022811-101132>
- Ohshima, T., Tanino, T., Guionet, A., Takahashi, K. & Takaki, K. (2021). Mechanism of pulsed electric field enzyme activity change and pulsed discharge permeabilization of agricultural products. *Japanese Journal of Applied Physics*, **60(6)**, 060501. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/abf479>
- Pallarés, N., Berrada, H., Tolosa, J. & Ferrer, E. (2021). Effect of high hydrostatic pressure (HPP) and pulsed electric field (PEF) technologies on reduction of aflatoxins in fruit juices. In *Lwt* (Vol. 142, p. 111000). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111000>
- Pérez-Lavalle, L., Carrasco, E. & Valero, A. (2020). Strategies for Microbial Decontamination of Fresh Blueberries and Derived Products. *Foods*, **9(11)**, 1558. <https://doi.org/10.3390/foods9111558>
- Picart-Palmade, L., Cunault, C., Chevalier-Lucia, D., Belleville, M.-P. & Marchesseau, S. (2019). Potentialities and Limits of Some Non-thermal Technologies to Improve Sustainability of Food Processing. *Frontiers in Nutrition*, **5(January)**, 130. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00130>
- Pinton, M. B., dos Santos, B. A., Lorenzo, J. M., Cichoski, A. J., Boeira, C. P. & Campagnol, P. C. B. (2021). Green technologies as a strategy to reduce NaCl and phosphate in meat products: an overview. *Current Opinion in Food Science*, **40**, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.011>
- Priyadarshini, A., Rajauria, G., Donnell, C. P. O. & Tiwari, B. K. (2018). Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1483890>
- Puértolas, E., López, N., Saldaña, G., Álvarez, I. & Raso, J. (2010). Evaluation of phenolic extraction during fermentation of red grapes treated by a continuous pulsed electric fields process at pilot-plant scale. *Journal of Food Engineering*, **98(1)**, 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.017>
- Ravindran, R. & Jaiswal, A. K. (2019). Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods. *Food Chemistry*, **285(August 2018)**, 363–368. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.02.002>
- Shahbaz, H. M., Akram, K. & Ahn, J. (2016). *Worldwide Status of Fresh Fruits Irradiation and Concerns about Quality, Safety, and Consumer Acceptance Worldwide Status of Fresh Fruits Irradiation and Concerns about Quality, Safety, and Consumer Acceptance*. 8398. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.787384>
- Shahbaz, H. M., Kim, J. U., Kim, S.-H. & Park, J. (2018). Chapter 7 - Advances in Nonthermal Processing Technologies for Enhanced Microbiological Safety and Quality of Fresh Fruit and Juice Products. In A. M. Grumezescu & A. M. Holban (Eds.), *Food Processing for Increased Quality and Consumption* (pp. 179–217). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811447-6.00007-2>
- Sharma, S. & Singh, R. k. (2020). Cold plasma treatment of dairy proteins in relation to functionality enhancement. *Trends in Food Science and Technology*, **102(May)**, 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.013>
- Singla, M. & Sit, N. (2021). Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, **73**, 105506. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105506>
- Sivaramakrishnan, R. & Incharoensakdi, A. (2019). Low power ultrasound treatment for the enhanced production of microalgae biomass and lipid content. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, **20(June)**, 101230. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101230>
- Strieder, M. M., Neves, M. I. L., Belinato, J. R., Silva, E. K. & Meireles, M. A. A. (2022). Impact of thermosonication processing on the phytochemicals, fatty acid composition and volatile organic compounds of almond-based beverage. *Lwt*, **154**, 112579. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112579>
- Targino, G., Pimentel, T. C., Gavahian, M., Lucena de Medeiros, L., Pagán, R. & Magnani, M. (2021). The combined effect of essential oils and emerging technologies on food safety and quality. *Lwt*, **147(April)**. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111593>
- Troy, D. J., Ojha, K. S., Kerry, J. P. & Tiwari, B. K. (2016). Sustainable and consumer-friendly emerging technologies for application within the meat industry: An overview. *Meat Science*, **120**, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.04.002>
- Ukuku, D. O., Niemira, B. A. & Ukanalis, J. (2019). Nisin-based antimicrobial combination with cold plasma treatment inactivate *Listeria monocytogenes* on Granny Smith apples. *LWT*, **104**, 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.049>
- Vanga, S. K., Wang, J., Jayaram, S. & Raghavan, V. (2021). Effects of pulsed electric fields and ultrasound processing on proteins and enzymes: A review. *Processes*, **9(4)**, 1–16. <https://doi.org/10.3390/pr9040722>
- Zhang, S., Sun, L., Ju, H., Bao, Z., Zeng, X. A. & Lin, S. (2021). Research advances and application of pulsed electric field on proteins and peptides in food. *Food Research International*, **139(1)**, 109914. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109914>
- Zhang, Wang, L.-H., Zeng, X.-A., Han, Z. & Brennan, C. S. (2019). Non-thermal technologies and its current and future application in the food industry: a review. *International Journal of Food Science & Technology*, **54(1)**, 1–13. <https://doi.org/10.1111/ijfs.13903>