

Universidad Zamorano
Departamento de Agroindustria Alimentaria
Ingeniería en Agroindustria Alimentaria



Proyecto Especial de Graduación
**Comparación del tratamiento de pasteurización versus diversas
tecnologías emergentes para la preservación de jugos de frutas:
Revisión de literatura**

Estudiante

Alvaro Avila Sabillon

Asesores

Jorge Cardona, Ph.D.

Blanca Valladares, M.Sc.

Honduras, marzo 2025

Autoridades

SERGIO ANDRÉS RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

ADELA M. ACOSTA MARCHETTI

Directora Departamento de Agroindustria Alimentaria

JULIO NAVARRO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros.....	4
Índice de Figuras	5
Resumen	6
Abstract.....	7
Introducción.....	8
Materiales y Métodos.....	11
Descripción del Estudio.....	11
Selección de Fuentes a Utilizar Acorde con Criterios de Exclusión e Inclusión	11
Resultados y Discusión.....	13
Pasteurización Convencional	13
Alta Presión Hidrostática	16
Pulsos Eléctricos.....	20
Plasma Frío.....	23
Microondas	27
Dióxido de Carbono	31
Comparación entre los Tratamientos en Jugos de Frutas	33
Jugo de Fresa.....	34
Jugo de Naranja	35
Jugo de Mango.....	36
Jugo de Piña	37
Otros Estudios.....	38
Conclusiones	40
Recomendaciones.....	41
Referencias.....	42

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Condiciones de pasteurización de distintos jugos de fruta.....	14
Cuadro 2. Condiciones de alta presión hidrostática aplicado a distintos jugos de fruta.....	17
Cuadro 3. Parámetros de pulsos eléctricos para distintos jugos de frutas.....	23
Cuadro 4. Parámetros para el procesamiento de jugos con plasma frío.....	26
Cuadro 5. Profundidad de penetración en líquidos con frecuencias a 915 MHz y 2450 MHz	27
Cuadro 6. Parámetros del proceso por microondas y efecto producido en jugos de frutas.....	29
Cuadro 7. Parámetros de ultrasonido para algunos jugos de fruta.....	31
Cuadro 8. Efecto del dióxido de carbono de fase densa en algunos jugos de frutas	33

Índice de Figuras

Figura 1. Pasteurizador de placas	14
Figura 2. Secciones que comprende un pasteurizador de placas	15
Figura 3. Pasteurizador tubular.....	16
Figura 4. Equipo a escala piloto para tratamiento con altas presiones	18
Figura 5. Alta presión hidrostática con compresión directa	19
Figura 6. Compresión indirecta.....	19
Figura 7. Esquema del equipo utilizado para PEF	21
Figura 8. Proceso de electroporación de acuerdo con la intensidad del tratamiento	22
Figura 9. Esquema de etapas en la generación de plasma frío.....	24
Figura 10. Tecnología para la generación de plasma DBD (izquierda) y plasma jet (derecha).....	25
Figura 11. Estructura de un calentador por microondas para líquidos	28
Figura 12. Fenómeno de cavitación durante la aplicación del ultrasonido	30
Figura 13. Diagrama de fases del dióxido de carbono	32

Resumen

El consumo de frutas tropicales ha aumentado en los últimos años debido a la preferencia de los consumidores hacia productos naturales, principalmente, por su alto contenido de compuestos bioactivos beneficiosos para la salud. El tratamiento más utilizado en la actualidad para la preservación de la calidad e inocuidad de los jugos es la pasteurización convencional. Su objetivo es lograr inactivar enzimas y microorganismos patógenos, de manera que no afecte significativamente la calidad sensorial del producto. Sin embargo, la pasteurización por ser un tratamiento térmico también disminuye el contenido de componentes nutricionales. De este modo, surgen otras tecnologías, que también pueden cumplir la función de conservación. El objetivo del estudio fue hacer una revisión de literatura enfocada en la comparación de métodos para la preservación de jugos de frutas: pasteurización convencional, altas presiones, ultrasonido, pulsos eléctricos, irradiación por microondas, dióxido de carbono de fase densa y plasma frío. Durante esta revisión se recopiló información acerca del principio de funcionamiento de cada una de las tecnologías, además de ofrecer una comparación entre los parámetros utilizados y su efecto en las características de distintos jugos de frutas. Los tratamientos térmicos pueden afectar negativamente ciertos compuestos bioactivos, como vitaminas y antioxidantes, mientras que las tecnologías emergentes pueden ser igual de eficiente y minimizan estas pérdidas

Palabras clave: alta presión, microondas, plasma frío, pulsos eléctricos, ultrasonido.

Abstract

The consumption of tropical fruits has increased in recent years due to consumer preference for natural products, primarily due to their high content of bioactive compounds beneficial to health. The most widely used treatment currently for preserving the quality and safety of juices is conventional pasteurization. Its objective is to inactivate enzymes and pathogenic microorganisms, which significantly do not affect the product's sensory quality. However, pasteurization, being a heat treatment, also decreases the content of nutritional components. Thus, other technologies are emerging that can also perform preservation functions. The objective of this study was to conduct a literature review focused on comparing methods for preserving fruit juices: conventional pasteurization, high pressure, ultrasound, electrical pulses, microwave irradiation, dense-phase carbon dioxide, and cold plasma. This review gathered information on the operating principle of each of the technologies, in addition to offering a comparison of the parameters used and their effect on the characteristics of different fruit juices. Heat treatments can negatively affect certain bioactive compounds, such as vitamins and antioxidants, while emerging technologies can be equally efficient and minimize these losses.

Keywords: cold plasma, electrical pulses, high pressure, microwave, ultrasound.

Introducción

El mercado mundial de jugos de frutas tropicales se encuentra en constante aumento, debido principalmente a factores del mercado como la preferencia por parte de los consumidores de producto naturales, buscando la concienciación sobre la salud y diversos estilos de vida. De acuerdo con la Market Research Company in Latin America Regions (2023) el mercado de jugo de frutas superó los USD 150 mil millones en el año 2023, estimando que se alcanzará un valor de casi 240 mil millones de USD en 2032. Lo anterior esta relacionado con el incremento en la tasa compuesta anual, que será de 4.85% durante los próximos años (Mordor Intelligence, 2023), demostrando un incremento en la demanda de jugos de frutas durante los próximos años.

La industria de alimentos experimenta una transformación a nivel mundial, pero principalmente en Latinoamérica y esta región se visualiza como un campo fértil para la innovación y el desarrollo, de manera que es adaptable a nuevas tendencias y desafíos del mercado global (The Food Tech, 2024). Una causa del aumento del consumo de productos naturales podría estar relacionado con la incidencia de enfermedades neurodegenerativas y cardiovasculares, habiendo problemas de salud pública que se centran en el envejecimiento de la población y aumento de prevalencia de enfermedades crónicas (Herrera Chalé et al., 2014) Estudios han demostrado que las frutas son la principal fuente de sustancias biológicamente activas, que contribuyen a su potencial quimiopreventivo (Jiménez-Colmenero, 2013). Los fitoquímicos son los compuestos más comunes presentes en frutas tropicales son las vitaminas C y E, carotenoides, compuestos fenólicos y fibra dietética; los cuales se han atribuido a la reducción del riesgo de desarrollar cáncer, alzheimer, cataratas y parkinson (Cárdenas et al., 2015).

De esta manera, se reconoce la importancia de estos productos en el mercado, siendo que los consumidores van en busca de aquellos productos derivados de frutas tropicales. Por esta razón, se vuelve necesario contar con un procesamiento adecuado, de manera que se garantice la calidad de lo que sale al mercado. Es recomendable llevar al consumidor productos que mantengan su calidad

fisicoquímica similar a la del jugo fresco, incluyendo el sabor, textura, color y propiedades nutritivas (Rodríguez et al., 2020). Respecto a la calidad de los jugos, Kubar y colaboradores (2018) indican que deben considerarse características como lo son el pH, acidez titulable, sólidos solubles totales, contenido de materia seca, cenizas, proteína cruda, ácido ascórbico, azúcares totales, azúcares reductores y la relación °Brix con acidez titulable.

Del mismo modo, no basta con tomar en cuenta la calidad del producto, también debe garantizarse la inocuidad del mismo y la estabilidad en anaquel. Por ello, muchas de las industrias optan por tratamientos térmicos como la pasteurización y en la industria de jugos de frutas este tratamiento es importante para lograr seguridad microbiana, estabilidad y reducir el deterioro enzimático (Dhar et al., 2022). Asimismo, se busca que esto sea en temperaturas de entre 60 °C y 100 °C para minimizar las pérdidas de compuestos bioactivos al destruir microorganismos o enzimas objetivo (Ağçam et al., 2018).

Actualmente se cuenta con tecnologías que buscan reemplazar los tratamientos térmicos pues tal como exponen Gamboa y colaboradores (2016) existen ingredientes alimentarios y productos que son sensibles a temperaturas de procesamiento y vulnerables a cambios químicos, físicos y microbiológicos. En general las principales desventajas de los tratamientos térmicos convencionales son: la mayor susceptibilidad de producir pérdidas de compuestos, la baja eficiencia en producción, la utilización de procedimientos que consumen altos niveles de energía por el abuso de tratamientos de calor prolongados (Chemat et al., 2011). De acuerdo con Soria y colaboradores (2010), el sometimiento de frutas a elevadas temperaturas durante tiempos largos de tratamiento se aumenta la pérdida de azúcares, vitaminas, compuestos antioxidantes y compuestos volátiles. Es así como surge la utilización de tecnologías alternativas o emergentes que permitan mejorar las condiciones de procesamiento, preservación y vida útil de alimentos procesados.

Dentro de las tecnologías alternativas pueden enumerarse las siguientes: tratamientos asistidos con ultrasonidos, tratamientos asistidos con microondas, utilización de dióxido de carbono

de fase densa, plasma frío, pulsos eléctricos de alta intensidad y la aplicación de altas presiones. Estas son tecnologías capaces de inactivar microorganismos a temperatura ambiente o temperaturas que no son elevadas, impidiendo así los defectos ocasionados por el uso de calor como tratamiento de conservación (Cheng et al., 2020).

Reconociendo la importancia de los jugos de frutas tropicales en el mercado global y un procesamiento adecuado que garantice la calidad e inocuidad, esta revisión tiene como objetivo comparar la pasteurización convencional con los tratamientos alternativos expuestos anteriormente. En este estudio se busca: Realizar una revisión de literatura acerca de las ventajas y desventajas para cada uno de estos métodos. Enumerar las limitaciones que tiene cada uno de estos dos métodos. Realizar un análisis acerca de los cambios fisicoquímicos y microbiológicos que se evidencian en los jugos al aplicar cada tratamiento.

Materiales y Métodos

Descripción del Estudio

Se realizó una búsqueda descriptiva acerca de siete tecnologías para la preservación de jugos de frutas, siendo estas: pasteurización convencional, uso de altas presiones, pulsos eléctricos, irradiación por microondas, dióxido de carbono de fase densa, plasma frío y ultrasonido. El enfoque fue dirigido hacia el funcionamiento de cada proceso y su efecto en parámetros sensoriales y nutricionales del producto. El objetivo principal de la revisión fue comprender el funcionamiento de las siete tecnologías para la preservación de jugos de frutas. Asimismo, se buscó comparar el efecto de estas tecnologías en la preservación de las características nutricionales y vida útil de los jugos. Esto con el fin de ampliar el conocimiento acerca de los beneficios de tratamientos con tecnologías emergentes, detallando las características del principio por el que se rige el proceso de altas presiones y las ventajas frente a los productos comerciales que son pasteurizados. Se detallan estudios comparando la inactivación de microorganismos y enzimas por ambos métodos, para finalmente definir cuál cuenta con una mejor eficiencia en la preservación de componentes nutricionales en los jugos de frutas tropicales.

Selección de Fuentes a Utilizar Acorde con Criterios de Exclusión e Inclusión

Se buscaron fuentes en internet referentes a artículos de investigación científica, bibliotecas digitales sobre medicina, en revistas científicas o bien tesis realizadas, utilizando únicamente buscadores académicos para seleccionar dichos artículos. Se consultaron fuentes de información primarias como revistas científicas, esto a través del buscador académico Google Scholar. También se consultaron tesis de pregrado y postgrado para la obtención de información, presentadas a diversas universidades. La información consultada fue únicamente en los idiomas español e inglés.

El principal criterio que se utilizó para la inclusión de las fuentes fue que estas tuvieran información acerca de la aplicación de las tecnologías descritas en jugos de frutas. El principal criterio de exclusión fue que la fuente no fuese lo suficientemente confiable (blogs), o que se tratara de

investigaciones muy antiguas. Para ello se estableció que el límite de antigüedad de las fuentes sea menor a 10 años, exceptuando un 20% de las fuentes las cuales podrán ser menor a 20 años.

Resultados y Discusión

Pasteurización Convencional

La pasteurización es un tratamiento térmico que estabiliza productos alimenticios al destruir microorganismos patógenos y/o inactivar enzimas (Cruz et al., 2006). Normalmente, la pasteurización en jugos de frutas tropicales sirve para estabilizarlos al inactivar enzimas. La pasteurización cuando se aplica en alimentos de alta acidez ($\text{pH} < 4.5$) busca la inactivación de enzimas, y en menor proporción la destrucción de los microorganismos patógenos. La principal enzima que busca inactivarse en jugos de naranja es la pectin-metilesterasa (PME), debido a que provoca cambios de calidad (turbidez, viscosidad, color, textura y sabor del jugo) significativos en el almacenamiento (Ortiz y Pinchao, 2012).

Los jugos de frutas tienen una alta acidez, el estudio de Ogbeide y colaboradores (2020) muestra como esta acidez es provocada principalmente por la presencia de ácido cítrico y málico.

Las temperaturas de pasteurización se encuentran por debajo de los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, normalmente estas varían de acuerdo con el tipo de fruta utilizada para preparar el jugo. Estas temperaturas varían debido a que cada fruta posee un pH diferente, y por lo tanto, también presentan distinta actividad enzimática. Un pH más bajo favorece la tasa de inactivación de patógenos y enzimas, de manera que se puede contar con tratamientos de pasteurización más cortos y con menor temperatura (Chakraborty y Shaik, 2023). De acuerdo con Ağçam y colaboradores (2018) el rango de temperatura establecido está entre $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ se aplican con el propósito de destruir microorganismos patógenos o enzimas causante de alteraciones.

La temperatura puede ser aplicada por el método LTLT (Long Time, Low Temperature) o HTST (High Temperature, Short Time). El proceso LTLT aplica temperaturas de $63\text{-}65\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 20-30 minutos, mientras que el HTST aplica temperaturas de $80\text{-}85\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante solo segundos. En la actualidad, son más utilizados los procesos HTST debido a que hay un menor tiempo de exposición al calor y puede disminuir las pérdidas de compuestos nutricionales en los jugos (Ortiz y Pinchao, 2012;

Villareal et al., 2013). En el Cuadro 1 se pueden observar tiempos y temperaturas de pasteurización para distintos jugos de frutas tropicales para la inactivación de enzima peroxidasa.

Cuadro 1

Condiciones de pasteurización de distintos jugos de fruta

Producto	Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Efecto
Jugo de mango	85	150	Inactivación de la enzima POD (peroxidasa)
Jugo de mandarina	82-94	132	
Jugo de naranja	75	90	
Jugo de tomate de árbol	80	90	
Jugo de mora	80	120	

Nota. Adaptado de Ortiz y Pinchao (2012); Villareal et al. (2013).

El control de la temperatura debe ser preciso, ya que el calor puede también alterar otros componentes del sabor. Por esta razón, se realizan diversas investigaciones para minimizar y precisar el tiempo y temperatura de exposición al calor y así cumplir con los objetivos establecidos anteriormente (Bhattacharjee et al., 2011).

Este proceso puede realizarse con diversos tipos de pasteurizadores, entre estos se puede encontrar el pasteurizador de placas y pasteurizadores tubulares. Gemina (2017) describe que los pasteurizadores de placas consisten en un paquete de placas de metal corrugadas, con escotillas para el paso de dos fluidos y el intercambio térmico entre estos. Normalmente, este tipo de pasteurizador se utiliza para jugos con bajo contenido en fibras (Figura 1).

Figura 1

Pasteurizador de placas

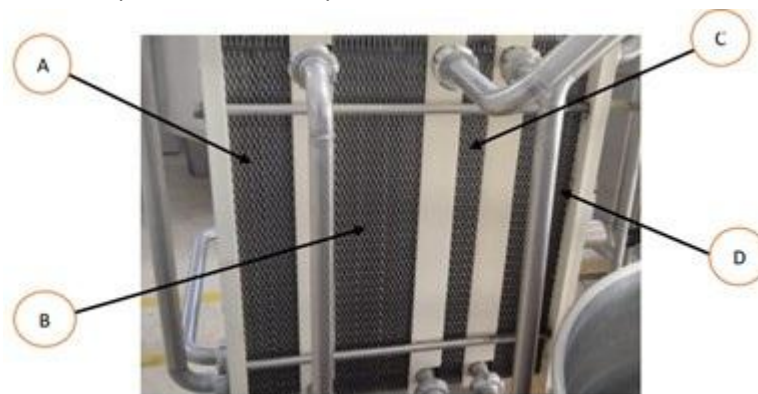


Nota. Tomada de Gemina (2017)

Ramos (2023) indica que la función de dicho equipo está destinada para productos de baja viscosidad. En la figura 2 pueden observarse las placas y sus distintas secciones. La sección A cuenta con una tubería de agua fría y de descarga del producto frío. Luego, la sección B, que se encuentra en la parte central, consta de una tubería que suministra el producto desde la bomba de alimentación, permitiendo así el flujo hacia las tuberías de retención que permiten enfriar el producto. En la sección C se cuenta con dos tuberías, estas tienen la función de recircular el producto y retornar el vapor de agua hacia la tina. Finalmente, la sección D simplemente cierra el conjunto de placas que se han descrito.

Figura 2

Secciones que comprende un pasteurizador de placas



Nota. Tomada de Ramos (2023)

Por otro lado, son utilizados también pasteurizadores tubulares los cuales son utilizados para productos con alta viscosidad y mantienen el mismo principio con la diferencia que son distintos tubos que permiten calentar y enfriar eficientemente el líquido durante determinado tiempo. Asimismo, estos son más eficientes en términos de energía en comparación con los pasteurizadores de placas (Hommak, 2023). Esto es debido a que el diseño permite una mejor transferencia de calor al darse un flujo continuo, además que minimizan la disipación de calor en comparación con las placas que pueden llegar a tener mayor exposición al ambiente.

Figura 3*Pasteurizador tubular*

Nota. Tomada de Hommak (2023)

Alta Presión Hidrostática

Esta tecnología también es conocida como pasteurización a alta presión. Rios-Corripio y colaboradores (2020) explican que en este proceso la presión es aplicada uniformemente y al instante, es decir, se aplica de manera inmediata sin una transferencia gradual, como ocurre con el calor en la pasteurización convencional. Este tratamiento se aplica para poder inactivar microorganismos, esto se logra debido a que se provoca daño o ruptura de la membrana; dificultando así el transporte de nutrientes y la eliminación de residuos de células, disminuye el pH intracelular e inactiva las enzimas (Gharibzahedi et al., 2019).

Este tipo de tecnología aplica presión generalmente en un rango de 100 a 600 MPa transmitida por un líquido acuoso en un sistema cerrado (Huang et al., 2020). El efecto de la alta presión hidrostática puede variar de acuerdo con las condiciones del procesamiento al que se está sometiendo, el estado fisiológico, la matriz y la forma de los alimentos (Andrés et al., 2016). Si se aplicara una presión menor a los 100 MPa no se lograría suficiente inactivación de microorganismos, mientras que superar los 600 MPa puede tener efectos en la textura o cambios de color y sabor en los jugos (Huang et al., 2020).

Perdomo Lamilla y colaboradores (2020) indican que esta tecnología puede utilizarse en frío, temperatura ambiente o a temperaturas menores a 60 °C. Asimismo, Bover-Cid y colaboradores (2011) explican que otra ventaja de este proceso es que puede ser aplicado en alimentos que ya se encuentran envasados, esto se considera como una pasteurización en frío, lo que a su vez disminuye la carga microbiológica y garantiza la inocuidad de productos listos para su consumo. El Cuadro 2 muestra los parámetros de esta tecnología para distintos jugos de frutas tropicales.

Cuadro 2

Condiciones de alta presión hidrostática aplicado a distintos jugos de fruta

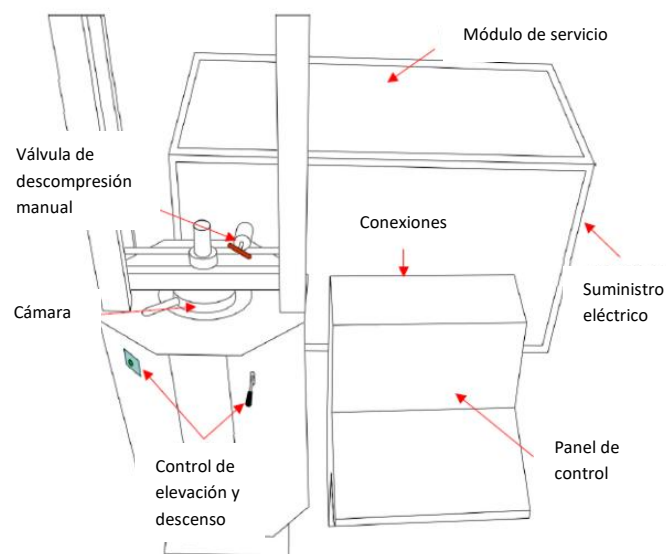
Producto	Presión (MPa)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Efecto	Fuentes
Jugo de mango	100-600	30	1-20	El pH disminuyó y la acidez titulable aumentó, favoreciendo estabilidad de la carga microbiana. A 600 Mpa por 5 min se logró una reducción de 4.6 log de la microflora natural (mesófilos aerobios, levaduras, coliformes y psicrótrofos)	Ancos et al. (2020)
	300	25	1	Disminución de 5 log de <i>E. coli</i>	
Jugo de fresa	120	25	1	Reducción de Bacterias Ácidofilas Termófilas y Hongos y Levaduras a un nivel por debajo del límite de detección	Ancos et al. (2020)
	250	50	1	Reducción de 6 log de <i>E. coli</i>	Martinez Giron et al. (2021)
Jugo de naranja	200-400	25	0.25-1	Se incrementaron los compuestos bioactivos y se mejoró la bioaccesibilidad	
Jugo de chirimoya	600	23-27	8	Disminuyó los recuentos microbianos en 5 log, microbiota variada que fue inoculada	Martinez Giron et al. (2021)
Jugo de melón	600	25	10	No se alteraron °Brix, pero hubo una disminución de vitamina C	Yildiz et al. (2021)

Nota. Adaptado de Ancos et al. (2020); Martinez Giron et al. (2021); Yildiz et al. (2021).

Existen distintos equipos para el tratamiento por altas presiones, ya sea a escala piloto o escala industrial. Uno de ellos, a escala piloto, es el Stansted Fluid Power High Pressure; modelo que puede llegar a trabajar a una presión máxima de 700 MPa. En la Figura 4 puede observarse un diagrama de dicho equipo.

Figura 4

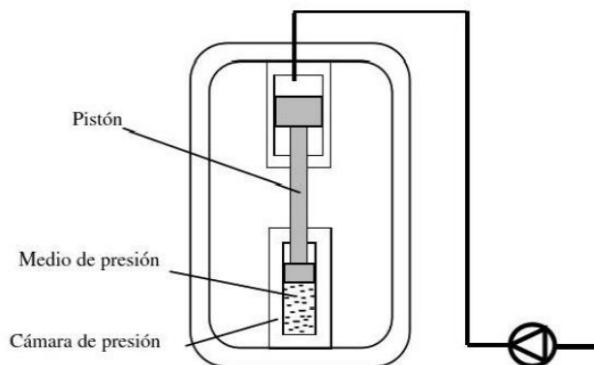
Equipo a escala piloto para tratamiento con altas presiones



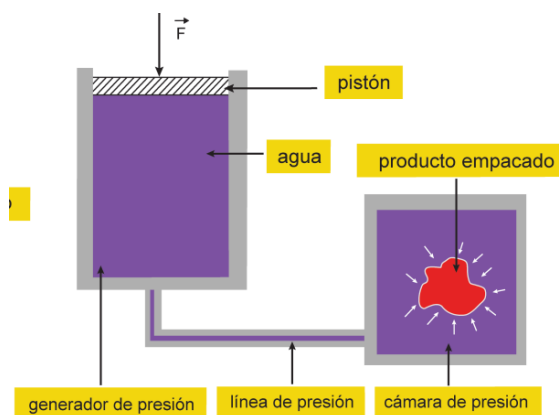
Nota. Tomada de Toledo (2016)

Para la descripción del equipo Toledo (2016) explica que se compone de una canasta donde son introducidas las muestras, un cilindro de presión de doble cara donde se aloja la solución estabilizante y una cámara de descompresión.

Por otro lado, Ruiz (2017) describe dos métodos para la aplicación de esta tecnología: compresión directa y compresión indirecta. Antes de la descripción de cada uno de estos es necesario reconocer que el sistema de aplicación de presión normalmente es agua potable con una pequeña cantidad de aceite soluble para lubricar y evitar corrosión. La Figura 5 muestra un diagrama de la compresión directa y este tipo de compresión emplea un pistón para presurizar, la alta presión se genera gracias a la presurización del medio con el pistón de diámetro pequeño.

Figura 5*Alta presión hidrostática con compresión directa**Nota.* Tomada de Ruiz (2017)

Como ventaja se encuentra que pueden darse compresiones muy rápidas, pero existen limitaciones de sellado entre el pistón y la superficie interna de la vasija (Ruiz, 2017); el método se utiliza con equipo a escala piloto como el descrito con anterioridad. Por el otro lado, la Figura 6 muestra un diagrama del método de compresión indirecta. Esta normalmente es utilizada con productos sólidos o semisólidos, ya que requiere de un intensificador de alta presión que bombea el medio presurizante desde un depósito hacia la cámara de presurizado. En la industria es de los métodos más utilizados y usualmente se utiliza agua como medio presurizante (Domínguez, 2013).

Figura 6*Compresión indirecta**Nota.* Tomada de Domínguez (2013)

Cada uno de los métodos descritos se rige fundamental por dos principios. El primero de ellos es el Principio de *Le Chatelier*, que enuncia que cualquier fenómeno que va acompañado de una disminución de volumen está favorecido por un aumento de la presión, y viceversa. El segundo es el Principio Isostático, que explica que una presión externa aplicada a un fluido confinado se transmite de forma uniforme e instantánea en todas las direcciones de la muestra (Herrero y Romero de Avila, 2006).

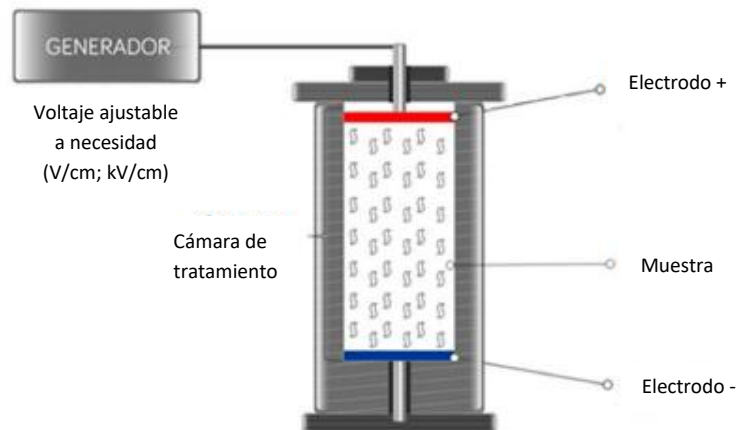
La aplicación de esta tecnología es viable para jugos de frutas tropicales, ya que se trata de líquidos que no llegan a sufrir muchos cambios estructurales o cambios en textura. Además, no utiliza calor, lo que permite mantener la calidad sensorial y valor nutricional de los productos (Aguiar et al., 2023).

Pulsos Eléctricos

Los pulsos eléctricos, también conocidos como PEF, es una de las tecnologías emergentes más populares pues este método tiene gran potencial de inactivación microbiana y enzimática, extensión de vida útil preservando propiedades nutricionales, sensoriales asociadas al sabor (M. Guo et al., 2014). Es un proceso ultracorto en cuanto a tiempo, de manera que resulta en una mejor calidad del producto debido a que los compuestos más sensibles no llegan a recibir daño. De acuerdo con Vivanco et al. (2021) esta tecnología usa pulsos de alto voltaje de corta duración, el tiempo varía entre mili y microsegundos, con un voltaje que puede ir desde 1 a 80 kV/cm; debajo de este rango no se tendría una buena inactivación microbiana, mientras que arriba de los 80 kV puede producirse un sobrecalentamiento del producto. En la Figura 7 puede observarse un esquema de un equipo que es utilizado para el tratamiento mediante PEF.

Figura 7

Esquema del equipo utilizado para PEF



Nota. Tomada de Vivanco (2021)

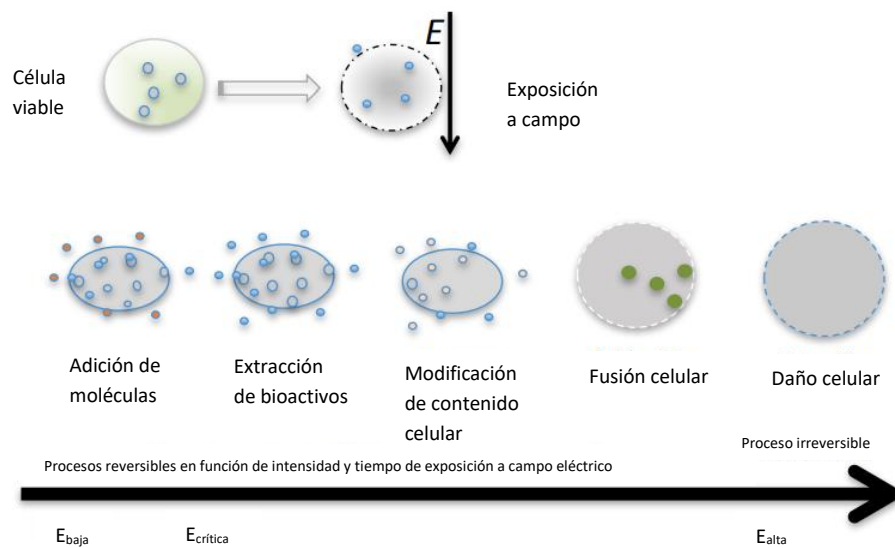
Básicamente el proceso es llevado a cabo en una recámara que se compone de dos electrodos conectados entre sí. Lo que ocurre es una inestabilidad local y tensión en la membrana celular del producto dentro de la recámara, promoviendo así la formación de poros en la membrana y dándose el efecto de electroporación. Esto da una mayor permeabilidad a la membrana, que es de bastante interés cuando se somete el producto a procesos posteriores como facilitar el secado al acortar el tiempo de exposición al calor, disminuyendo la degradación de compuestos termolábiles (D. Niu et al., 2020).

Existen dos tipos de tratamiento aplicando pulsos eléctricos: de baja intensidad (aplicado a alimentos sólidos) y de alta intensidad (aplicado a alimentos líquidos). En jugos se busca una reducción en la carga microbiana, al darse la electroporación se ocasiona un daño irreversible en la membrana celular, ocasionando la muerte del microorganismo (Sánchez, 2024). En la Figura 8 puede verse el detalle del proceso de la electroporación. En un inicio la célula se encuentra intacta, una vez se expone al campo eléctrico se inducen diversos efectos dependiendo de la intensidad y el tiempo de exposición. Al aplicarse una intensidad baja se pueden dar procesos como la adición de moléculas, la

extracción de compuestos bioactivos, además de la modificación del contenido celular; estos efectos son reversibles, esto en aplicaciones de 1 a 2 kV/cm. Por otro lado, al aplicarse intensidades altas, es decir mayores a 10 kV/cm, es cuando se llega a ocasionar la destrucción irreversible de la membrana celular de los microorganismos o enzimas.

Figura 8

Proceso de electroporación de acuerdo con la intensidad del tratamiento



Nota. Tomada de García (2016)

Asimismo, como lo explica Pérez-Lavalle y colaboradores (2020) los factores que determinan el efecto de este tratamiento en los microorganismos no solo dependen de la intensidad del campo eléctrico, también depende del tiempo de tratamiento, la forma de pulso, y la temperatura de inicio; además de parámetros del alimento que incluyen la composición, el pH y la conductividad.

En los jugos de frutas el interés no solo radica en microorganismos, más bien se centra en la inactivación enzimática. Roobab y colaboradores (2022) explican que para la inactivación enzimática se deben tomar en cuenta diversos parámetros como el ancho del pulso, frecuencia, intensidad del campo eléctrico y tiempo del tratamiento. Se explica que, generalmente el tratamiento con PEF aumenta los sitios activos de las enzimas. Además, también cambia los enlaces secundarios que

mantiene las moléculas de las enzimas; por otro lado, se llegan a producir radicales libres debido a reacciones electroquímicas que atacan potencialmente a estas (Zhang et al., 2011).

Para la industria de jugos de frutas se han hecho estudios, donde se ha comprobado el efecto para la inactivación de ciertas enzimas; se ha demostrado que este tratamiento es efectivo en jugos de manzana, fresa, sandía y cítricos. Las enzimas más susceptibles han sido la PPO (polifenol oxidasa), POD (peroxidasa) y PME (pectinmetilesterasa) (Roobab et al., 2022). En el Cuadro 3 se observa una recopilación de los parámetros utilizados para estos jugos y la enzima que llegan a desactivar.

Cuadro 3

Parámetros de pulsos eléctricos para distintos jugos de frutas

Producto	Enzima objetivo	Potencia y tiempo	Frecuencia	Efecto	Fuentes
Jugo de fresa	PPO	35 kV/cm por 1000-2000 μ s	50-250 Hz	AR de PPO reducida en un 2.5%	Roobab et al. (2022)
Jugo de manzana	PPO y POD	0-35 kV/cm por 1000-2000 μ s	-	AR de PPO y POD fue de 7.1-98.5% y 9.6-94.2%	Abida et al. (2022)
Jugo de mango	PPO, POD y LOX	35 kV/cm por 50-2000 μ s	200 Hz	respectivamente 70%, 53% y 44%, PPO, LOX y POD AR	Chacha et al. (2022)
Jugo de naranja	PME	13.8-25.3 kV/cm por 1033-1206 μ s	500 Hz	respectivamente en 1800 μ s 93.8% de inactivación de la enzima a 25.26 kV/cm en 1206.2 μ s	Athar et al. (2022)
Jugo de uva	PPO y POD	25-35 kV/cm por 1-5 μ s	200-1000 Hz	Inactivación del 100% de PPO y 50% de POD	Madni et al. (2022)

Nota. Tomado de Roobab et al. (2022); Abida et al. (2022); Chacha et al. (2022); Athar et al. (2022); Madni et al. (2022) PPO (polifenol oxidasa), POD (peroxidasa), PME (pectinmetilesterasa) y LOX (lipoxigenasa).

Plasma Frío

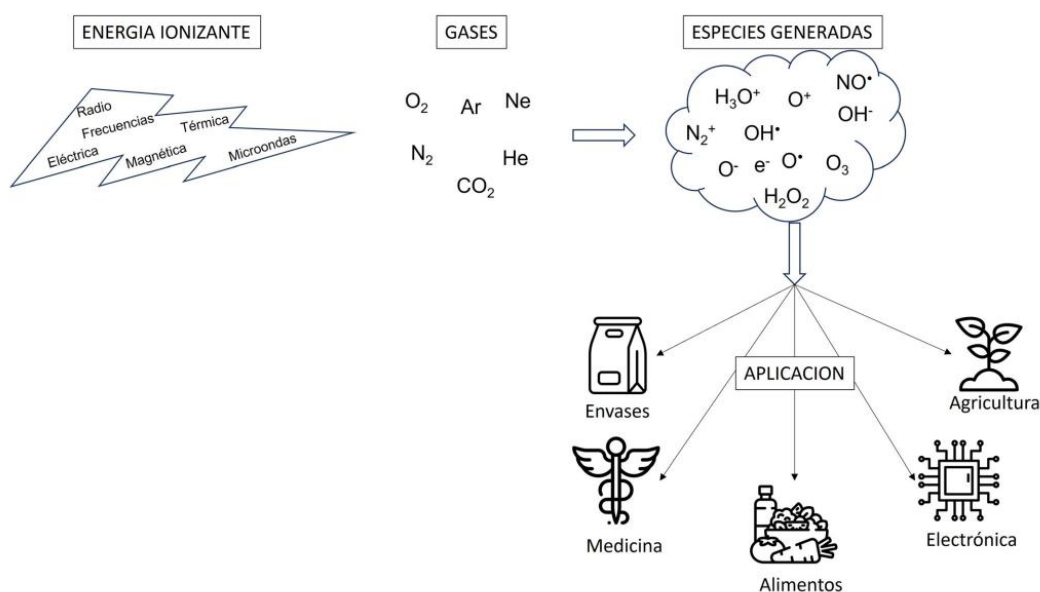
La tecnología de plasma frío está emergiendo como una de las opciones más prometedoras de las tecnologías no térmicas. Okyere et al. (2022) definen el plasma como un gas parcial o completamente ionizado, que se encuentra compuesto de electrones, iones, radicales libres, fotones,

radiación ultravioleta, especies reactivas y moléculas. Para poder generar plasma frío es necesario que un gas o una mezcla de gases se exponga a algún tipo de energía bajo condiciones específicas. La energía empleada puede ser térmica, eléctrica, de campos magnéticos, radiofrecuencias o microondas (Thirumdas et al., 2015).

Al generar plasma frío se obtienen diversas especies altamente reactivas, las más comunes son especies reactivas de oxígeno (ROS) y especies reactivas de nitrógeno (NOS). Puente-Díaz (2024) enumera especies como el oxígeno atómico (O), superóxido de hidrógeno (O_2^-), peróxido de hidrógeno (HO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y nitratos (NO_3);. La presencia y concentración de las especies anteriores varía de acuerdo con la distancia entre el electrodo y elemento generador, presencia de humedad, y sobre todo, de la composición gaseosa empleada (Roobab et al., 2023). En la Figura 9 puede observarse un esquema de las etapas para la generación del plasma frío.

Figura 9

Esquema de etapas en la generación de plasma frío



Nota. Tomada de Diaz (2024)

El plasma frío (PF) se puede clasificar en: PF de baja presión o PF atmosférico (PFA). El PF de baja presión es generado con presiones que varían entre <1 Pa hasta 100 Pa, mientras que el PFA con

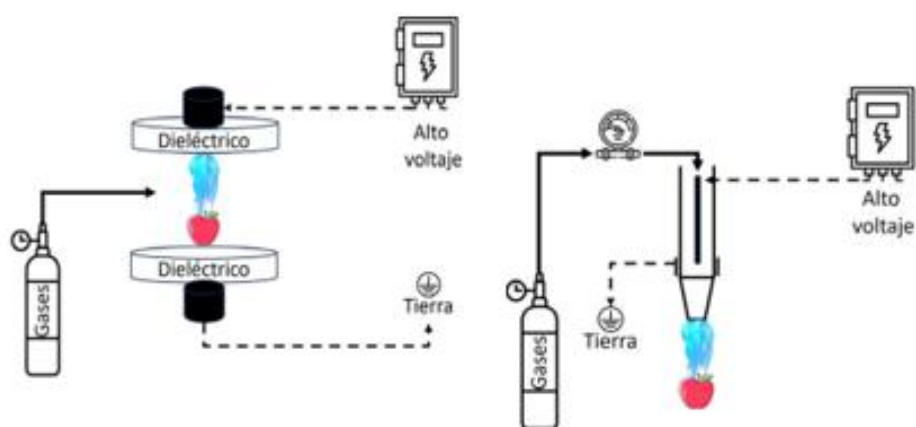
las condiciones estándar de la atmósfera (101,325 Pa) (Tirado-Kulieva et al., 2021). El PFA es el utilizado en alimentos como los jugos de frutas, además es el de mayor interés dentro de la industria alimenticia debido a la conveniencia de no requerir altas temperaturas y ajustes en la presión mediante una recámara (Chizoba Ekezie et al., 2017).

Para la generación del PFA existen distintas tecnologías, pero dentro de la industria de jugos las más utilizadas son el plasma jet y la descarga de barrera dieléctrica, esto debido a que tienen la mayor cantidad de configuraciones exploradas para la descontaminación y calidad de los jugos. Además, son fáciles de adoptar y simples en su construcción (Ozen y Singh, 2020). El uso entre una u otra es de acuerdo con los componentes disponibles para el uso del equipo.

Puente-Díaz (2024) muestra que la descarga de barrera dieléctrica (DBD) consiste en dos electrodos planos o anulares dispuestos en paralelo, al menos uno está recubierto por un material dieléctrico que puede ser de sílice, cerámica, capas finas de esmalte o materiales poliméricos. Por otro lado, para la generación de plasma jet se debe impulsar una mezcla de gases a través de un tubo de cuarzo, que en su interior contiene electrodos de alto voltaje y de tierra. En la Figura 10 puede observarse una representación gráfica de ambas tecnologías.

Figura 10

Tecnología para la generación de plasma DBD (izquierda) y plasma jet (derecha)



Nota. Tomada de Diaz (2024)

En cuanto a su función dentro de jugos de frutas, el plasma puede inactivar microorganismos pues al generar el plasma frío se obtienen distintas especies reactivas (ya sea de oxígeno o nitrógeno), entre estos pueden encontrarse electrones, radicales libres y fotones UV. Estos fotones pueden conducir a la formación de dímeros de timina, lo que causa una modificación en su ADN que no permite su replicación, ocasionando la muerte del microorganismo (Waghmare, 2021). Asimismo, Pankaj y Keener (2017) explican que las especies generadas también tienen un efecto en la superficie externa de las células de los microorganismos. Por otro lado, Thirumdas y colaboradores (2015) también explican que el plasma tiene un mayor efecto en organismos húmedos, de manera que es más efectivo.

Finalmente, en cuanto a enzimas se ha probado que el plasma frío puede inactivarlas, por ejemplo polifenol oxidasa, peroxidasa y pectinmetilesterasa (Waghmare, 2021). Del mismo modo, Porto y colaboradores (2020) indican que las especies reactivas de oxígeno o nitrógeno generadas pueden reaccionar con estas enzimas y alterar su estructura, lo que disminuye su actividad. El Cuadro 4 muestra algunos parámetros para el proceso del plasma frío y su efecto en la reducción de microorganismos.

La aplicación del plasma frío en jugos es variada, donde se cambian parámetros principalmente en cuanto a la potencia, gas utilizado y tiempo. También influye el propósito de la aplicación de este tratamiento, si se trata del control de un microorganismo, enzimas o evitar cambios en características fisicoquímicas y nutricionales.

Cuadro 4

Parámetros para el procesamiento de jugos con plasma frío

Producto	Tipo de plasma	Condiciones	Efecto	Fuentes
Jugo de naranja	HVACP	90kHz, 60s, gas = aire	Reducción de 5 log de <i>S. enterica</i> , no hubo cambios en color, Brix y pH	Shi et al., (2011)
Jugo de manzana Jugo de mora	Jet plasma	25kHz, 600W, gas = aire	Decrecimiento significativo de <i>E. coli</i> , se mantuvo el contenido fenólico	Dasan y Boyaci (2018)

Producto	Tipo de plasma	Condiciones	Efecto	Fuentes
Agua de coco	DBD	90Kv, 120s, gas = 78%N ₂ , 21%O ₂ y trazas de otros gases	Inactivación de E. coli y L. monocytogenes, almacenamiento a baja temperatura aumentó vida útil	Porto et al. (2020)
Jugo de piña	DBD	60kHz, 420s, gas = aire	Reducción de 8.2 log de Enterococcus faecalis	Waghmare et al. (2021)

Nota. Adaptado de Waghmare (2021); Shi et al., (2011); Dasan y Boyaci (2018); Porto et al. (2020) HVACP = plasma frío atmosférico de alto

voltaje, DBD = descarga de barrera dieléctrica.

Microondas

La conservación mediante microondas utiliza el mecanismo de calentamiento dieléctrico, Jiang y colaboradores (2018) explican que esta tecnología impulsa moléculas polares que se calientan al cambiar de posiciones de equilibrio, creando energía de calentamiento a partir de la fricción molecular interna. Entre los beneficios de esta tecnología se encuentra 1) aumenta la velocidad del proceso, 2) calentamiento uniforme del jugo, 3) eficiencia alta de energía (Zhang et al., 2010).

Para obtener efectos similares a procesos de pasteurización o esterilización en líquidos o semilíquidos, se utiliza esta tecnología a una frecuencia de 915 MHz. Esto es debido a que tiene una mejor profundidad de penetración para un calentamiento más uniforme (Guo et al., 2017), sin embargo, también se hace uso de frecuencias a 2450 MHz, aunque su aplicación es enfocada a solamente la superficie del alimento (Wu et al., 2022). Esto es debido a que mientras menor sea la frecuencia, las ondas de microondas penetran más antes de ser absorbidas. En el Cuadro 5 se muestra una comparación entre la profundidad de penetración entre ambas frecuencias.

Cuadro 5

Profundidad de penetración en líquidos con frecuencias a 915 MHz y 2450 MHz

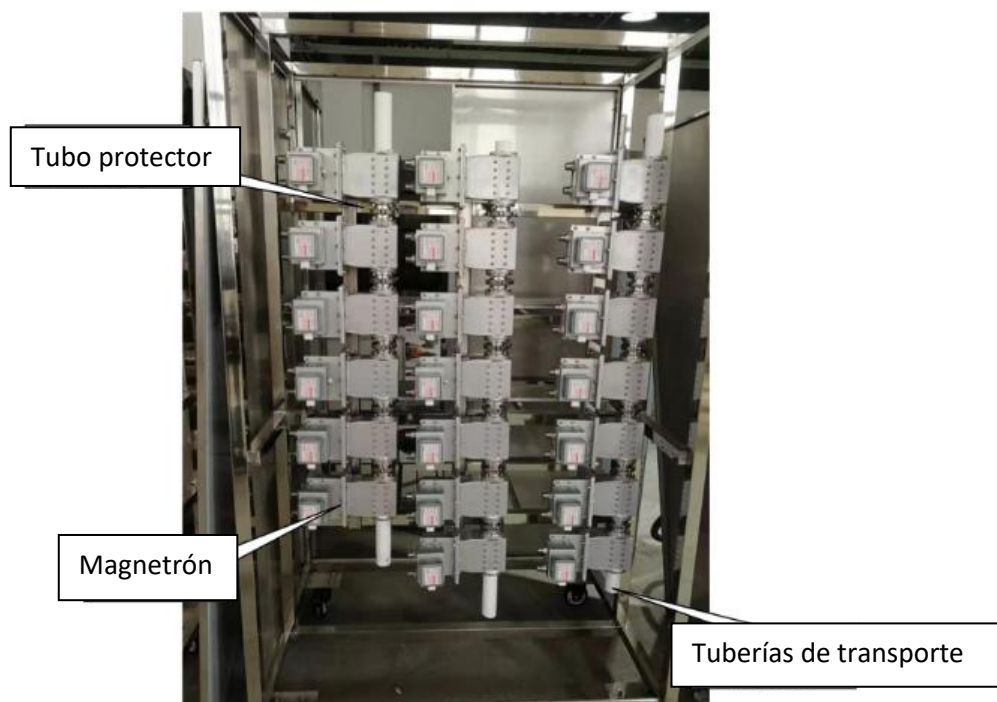
Temperatura (°C)	Penetración a 915 MHz (cm)	Penetración a 2450 MHz (cm)	Fuentes
33	12.0	1.8	Lv et al. (2019)
45	13.8	2.0	Dong et al. (2019)
55	16.3	2.3	Hao et al. (2019)
65	19.0	2.8	Xin et al. (2019)
75	21.5	3.2	Qinghua et al. (2019)

Nota. Tomado de Lv et al. (2019); Dong et al. (2019); Hao et al. (2019); Xin et al. (2019); Qinghua et al. (2019)

En una recámara de calentamiento por microondas el sistema de flujo continuo es el componente principal. La Figura 11 muestra dicho componente, compuesto por magnetrones, tuberías de transporte y un tubo protector. La fuente de poder del microondas proviene de una serie de magnetrones con una frecuencia de 2450 MHz (Wu et al., 2022). Las tuberías de transporte están hechas de politetrafluoroetileno (PTFE), cerámico, cuarzo y otros materiales que pueden pasar por el sistema sin ningún problema (Cherbański y Rudniak, 2013). Finalmente, el tubo protector transmite energía y previene fugas.

Figura 11

Estructura de un calentador por microondas para líquidos Fuente: Wu et al. (2022)



Nota. Tomada de Wu (2022)

De acuerdo con Guo y colaboradores (2017) la inactivación microbiana por medio de esta tecnología se puede explicar por varias razones: calentamiento selectivo, electroporación, ruptura de membrana celular y acoplamiento de campo magnético. Al usarse este tratamiento también se da uso de calor, pero este es mediante irradiación, de esta manera los cuerpos microbianos pueden alcanzar temperaturas más altas que los fluidos, llevándolos a su destrucción. La electroporación es debido a

que también existen ciertos campos magnéticos que pueden generar poros en la membrana, fugándose material celular. Por último, se pueden destruir componentes vitales de las células, como proteínas o ADN que se encuentren acopladas al campo magnético.

En cuanto a su efectividad para inactivar enzimas se encuentra solamente un estudio para la inactivación de pectinmetilesterasa en jugo de naranja, por lo que es una oportunidad de investigación. Asimismo, el Cuadro 6 muestra algunas condiciones para la aplicación del tratamiento y su efecto en los jugos.

Cuadro 6

Parámetros del proceso por microondas y efecto producido en jugos de frutas

Producto	Temperatura	Tiempo	Efecto	Frecuencia	Fuentes
Jugo de naranja	82.5 °C-90 °C	18-78 s	Inactivación efectiva de la enzima pectinmetilesterasa		Amaro y Tadini (2021)
	35°C	11 min	Eliminación de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	915 MHz	
Jugo de manzana	80 °C-90 °C	25 s	Reducción de 5 log de <i>E. coli</i> O157H7 y <i>S. typhimurium</i>		Mendes et al. (2020).

Nota. Adaptado de Amaro y Tadini (2021); Mendes et al. (2020).

Ultrasonido

Esta tecnología se basa en el paso de ondas que pueden crear regiones de alta y baja presión en el producto, esto genera microburbujas en el sistema para darse luego un proceso llamado cavitación (Fu et al., 2020). Es gracias a este proceso que se llega a dar un efecto antimicrobiano, Pérez-Lavalle y colaboradores (2020) explican como la cavitación altera la membrana celular del microorganismo y produce daños en la estructura del ADN, esto también se ve potenciado debido a la formación de radicales libres con esta tecnología.

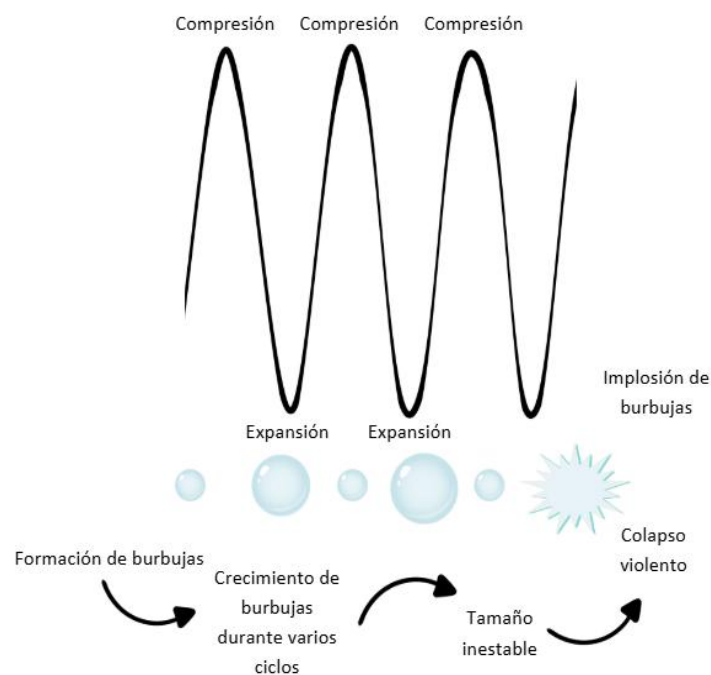
Herrera (2024) resalta que el potencial de esta tecnología en jugos es alto, debido a que las pulsaciones acústicas se transmiten inmediatamente por todo el volumen. Esto también ayuda acelerando reacciones bioquímicas que provocan inactivación enzimática y microbiana.

Normalmente, se aplican frecuencias de 20-100 kHz con potencias de 10-1000 W/cm² (Salehi, 2020). Frecuencias menores a los 20 kHz genera una cavitación ineficaz, lo que puede no inactivar microorganismos. Por otro lado, a frecuencias mayores a 100 kHz las burbujas de cavitación se forman, pero colapsan de manera menos intensa, provocando nuevamente una inactivación menor (Pérez-Lavalle et al., 2020). Para comprender mejor la aplicación de ultrasonido en una matriz alimentaria la Figura 12 presenta un esquema del proceso de cavitación.

Esto es explicado por Caballero-Figueroa y colaboradores (2022), la cavitación consiste en ciclos alternados de expansión y compresión en un medio líquido. Para la fase de expansión, las ondas ultrasónicas de alta intensidad crean pequeñas burbujas que se fusionan gradualmente, luego en la fase de compresión estas burbujas alcanzan un tamaño donde colapsan y llegan a afectar la estructura celular dando un efecto de esterilización. Todo esto ocurre en el producto a nivel molecular, ocasionando daños a microorganismos.

Figura 12

Fenómeno de cavitación durante la aplicación del ultrasonido



Nota. Tomada de Figueroa (2022)

Dentro de las ventajas de esta tecnología se explica que el procesamiento ayuda con la reducción de tiempos y temperatura lo que podría permitir un mayor rendimiento (Eom et al., 2021). Sin embargo, también cuenta con ciertas limitaciones, una de ellas es que su profundidad de penetración se ve afectada por sólidos y aire disuelto en el producto, lo que lleva a escoger las frecuencias y condiciones de tratamiento adecuadas para distintos tipos de matriz alimentaria (Priyadarshini et al., 2019). El Cuadro 7 muestra parámetros empleados para la tecnología de ultrasonido y los efectos en la calidad de los jugos.

Cuadro 7

Parámetros de ultrasonido para algunos jugos de fruta

Producto	Frecuencia (kHz)	Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Efecto	Fuente
Jugo de naranja	20	22	75	Inactivación de pectinmetilesterasa	Paniwnyk et al. (2017)
Jugo de manzana	25	60	20	Inactivación de enzimas (polifenolasa, peroxidasa y pectinmetilesterasa) y de microflora natural	Paniwnyk et al. (2017)
Jugo de fresa	40	10	-	Recuento reducido de levaduras y mohos	Paniwnyk et al. (2017)

Nota. Tomada de Paniwnyk et al. (2017)

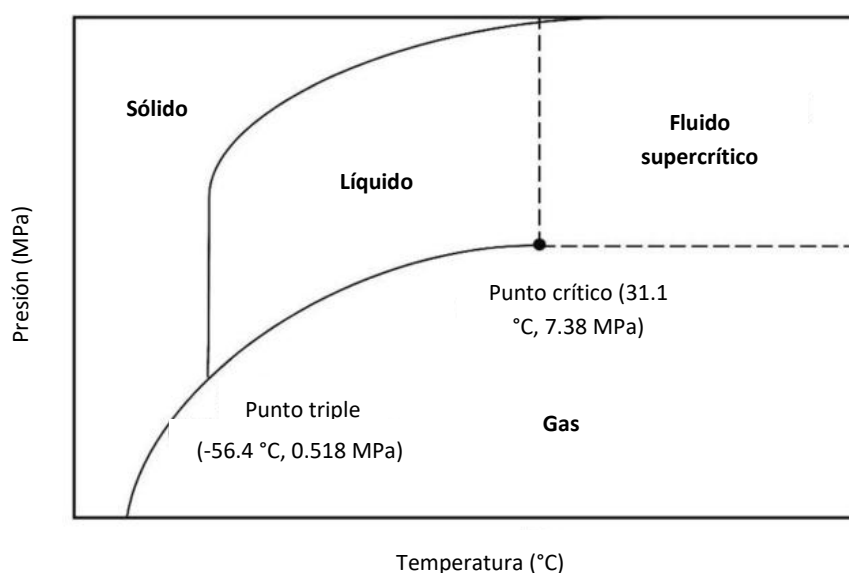
Dióxido de Carbono

El dióxido de carbono es un componente barato, no tóxico y no inflamable que puede ser utilizado en el procesamiento de alimentos simulando efecto de la pasteurización o esterilización de productos. Los procesos que involucran dióxido de carbono consisten en mezclar este componente en estado líquido, gaseoso o supercrítico en una materia sólida o líquida (Picart-Palmade et al., 2018). Dentro de sus usos más comunes está el dióxido de carbono de fase densa (DPCD), también llamado dióxido de carbono de alta presión (HPDC) o dióxido de carbono supercrítico (SC-CO₂). La tecnología consiste en el uso de presión en combinación con este componente, cambiando su estado entre líquido y gaseoso, lo que permite que destruya microorganismos (Jermann et al., 2015).

Se pueden encontrar distintas fases del dióxido de carbono, tal y como la muestra la Figura 13. Al estar cambiando la temperatura y la presión (0.1 y 50 MPa) se puede obtener CO₂ en distintos estados. Además, la eficiencia para la destrucción de microorganismos se relaciona con factores como: especie de microorganismos, concentración de células, contenido de agua, pH y estado físico del dióxido de carbono (Yu et al., 2020).

Figura 13

Diagrama de fases del dióxido de carbono



Nota. Tomada de Yu (2020)

Xu et al. (2017) explica el mecanismo de acción del dióxido de carbono contra microorganismos indicando que el CO₂ inactiva células vegetativas principalmente al alterar la membrana celular. La solubilización del CO₂ reduce el pH, aumentando la permeabilidad y facilitando su entrada a la célula, logrando desestabilizar la membrana, altera la distribución de fosfolípidos y proteínas, y disminuye la actividad de enzimas esenciales. Además, el CO₂ provoca la fuga de contenido citoplasmático, la precipitación de ribosomas y electrolitos intracelulares, afectando la homeostasis y la expresión genética, lo que lleva a la inactivación microbiana.

Asimismo, esta tecnología puede inactivar enzimas y acorde con Monhemi y Dolatabadi (2020) la estructura terciaria de proteínas y enzimas es cambiada de globular conformaciones planas y extendidas; es a este cambio de estructura que se le atribuye la inactivación. Estudios han demostrado el uso de esta tecnología para la inactivación de enzimas como la peroxidasa y polifenol oxidasa en jugos de fresa y manzana (Manzocco et al., 2017; Marszałek, Skąpska, et al., 2015). Por otro lado, en jugos de naranja se han encontrado que puede actuar sobre la pectinmetilesterasa (Briongos et al., 2016; Sultani et al., 2025). Esto se puede observar en el Cuadro 8.

Cuadro 8

Efecto del dióxido de carbono de fase densa en algunos jugos de frutas

Producto	CO ₂	Presión (Mpa)	Temperatura y tiempo	Efecto	Fuentes
Jugo de naranja		oct-30	2-40 °C/3-60min	Disminución en la actividad de pectinmetilesterasa. Efecto limitado en color, pH y contenido de vitamina C	Briongos et al. (2016)
Jugo de manzana	Inyección de CO ₂ mediante una bomba hasta alcanzar la presión deseada	6, 12 y 18	20 °C, 35 °C y 45 °C / 30min	A 12MPa y 35 °C se alcanzó la mínima actividad enzimática residual (20%) en 10 minutos. Menor actividad de polifenoloxidasa. No se detectaron levaduras ni mohos, en cuanto al recuento microbiano total se logró una reducción de 1.7 log.	Manzocco et al. (2017)
Jugo de fresa		30-60	45 °C/30min	Se inactivó polifenoloxidasa y se redujo en un 85% la peroxidasa	Marszałek et al. (2015)

Nota. Adaptado de Briongos et al. (2016); Manzocco et al. (2017); Marszałek et al. (2015)

Comparación entre los Tratamientos en Jugos de Frutas

A lo largo de los años se han realizado diversas investigaciones en la aplicación de estas tecnologías para determinar cuál de ellas puede conservar la calidad sensorial y nutricional de los

jugos. Esto se ha realizado con distintas frutas, de las cuales se hará una síntesis de lo que se ha logrado obtener.

Jugo de Fresa

Karacam y colaboradores (2015) aplicaron altas presiones a 60 y 100 MPa en diferentes ciclos evaluando el efecto en la calidad de propiedades físicas y química del jugo de fresa. Se mantuvo la capacidad antioxidante y nivel de compuestos fenólicos; llegando a la conclusión de que esta tecnología puede ser utilizada para la conservación de dichas propiedades, presentando a su vez un efecto positivo en el color del jugo al mantenerlo. Esto se reafirma con lo expuesto por Yildiz y colaboradores (2021) donde los tratamientos de alta presión promueven una mayor retención del contenido fenólico total y una mayor actividad de eliminación de radicales, además de mejorar el contenido de antocianinas. Mediante esto se confirma también como la tecnología de alta presión hidrostática ayuda con la extensión de la vida útil, ya que según Buvé y colaboradores (2018) las temperaturas de almacenamiento altas y la mayor disponibilidad de oxígeno aceleran el cambio de color en el jugo de fresa pasteurizado. Asimismo, Dubrović y colaboradores (2011) encontraron que la pasteurización reduce el contenido de antocianina en el jugo de fresa entre un 5.3 y 5.8%.

Yildiz y colaboradores (2021) evaluaron las características del jugo de fresa al aplicar altas presiones y pulsos eléctricos; se reportó que las altas presiones (300 MPa/1 min) y pulsos eléctricos (35kV/cm por 27 μ s) tuvieron resultados similares en el contenido de fitoquímicos a diferencia de muestras pasteurizadas térmicamente. Asimismo, se ha demostrado como el uso de altas presiones (300 MPa/ 1 min), ultrasonido (55 °C, 24 kHz, 3 min) y pulsos eléctricos (35kV/cm por 27 μ s) pueden llegar a disminuir al menos 5-log de *E. coli* (Yildiz et al., 2019). Asimismo, los pulsos eléctricos son efectivos para la inactivación de polifenol oxidasa, con un tratamiento de 35kV/cm por 1000 μ s (Aguiló-Aguayo et al., 2009).

Mehta y Yadav (2020) aplicaron la tecnología de plasma frío usando la configuración de descarga de barrera dieléctrica a 60kV durante 15 minutos, para luego combinar con un tratamiento

hidrotermal; como resultado se aumentó el contenido fenólico, además de retener nutrientes como la vitamina C. Finalmente, el tratamiento con microondas a 90 °C durante 15 minutos logró una inactivación efectiva de polifenol oxidasa (82%) y peroxidasa (88%), además de la preservación de color y nutrientes. Esto comparado a la pasteurización convencional a 90 °C durante 15 minutos, donde si existió una degradación de polifenoles (7%), antocianinas (20%) y vitamina C (48%)(Marszałek et al., 2015).

Jugo de Naranja

Stinco et al. (2020) compararon el uso de alta presión de homogenización contra la pasteurización, donde al hacer uso de las altas presiones se encontró el mismo nivel nutricional en cuanto a la capacidad antioxidante que un jugo de naranja fresco, mientras que el pasteurizado cuenta con valores más bajos. Asimismo, Ancos et al. (2020) compararon también estos tratamientos, encontrando que la alta presión redujo mayormente la carga microbiana en comparación con el jugo pasteurizado.

Borras (2020) realizó una optimización de la pasteurización del jugo de naranja con el objetivo de inactivar la flora microbiana preservando su calidad. Sin embargo, aplicar altas temperaturas (83 °C) durante corto tiempo (54s) no inactivó efectivamente los microorganismos; también encontró que hay una mayor retención de vitamina C cuando se aplican tratamientos térmicos más cortos y de mayor temperatura. Por otro lado, Martínez Giron et al. (2021) determinó tiempo y temperaturas adecuadas para inactivar la enzima peroxidasa en jugo de naranja, siendo una temperatura de 75 °C durante 90 segundos; esto ayuda a conservar los jugos de 10 a 12 días a temperatura de refrigeración (0 a 10 °C).

La aplicación de pulsos eléctricos para jugo de naranja ha demostrado extender su vida útil (20 días refrigerado a 4 °C) preservando sus compuestos bioactivos (Fabroni et al., 2024). En cuanto a la aplicación de plasma frío, Pankaj et al. (2018) encontraron que no había efectos en el pH del jugo y hubo un aumento significativo en el total de flavonoides, esto gracias a las especies reactivas

generadas, que llegan a reaccionar con los compuestos ya presentes en el jugo. Del mismo modo, Martins y colaboradores (2021) compararon el uso de microondas con el tratamiento convencional de pasteurización (75 °C/15s); de manera que la tecnología de microondas a 65 °C por 60 segundos resultó en una mayor retención de compuestos bioactivos, contando con niveles más altos de ácido ascórbico, fenoles, carotenoides y una mayor actividad antioxidante.

El tratamiento con ultrasonido ha demostrado una buena aceptación por parte de panelistas, siendo comparados con jugos de naranja frescos que no cuentan con ningún tratamiento (Khandpur y Gogate, 2015). En cuanto a sus características microbiológicas, tratamientos de ultrasonido a 20 o 40 kHz por 24 minutos y 64 °C, muestran ser efectivos para inactivar esporas y células vegetativas sin afectar significativamente el contenido de vitamina C (Wahia et al., 2021).

El dióxido de carbono de fase densa también ha sido utilizado, se ha demostrado que este puede mejorar las propiedades físicas y nutricionales en comparación con jugos de naranja sin tratar y tratados térmicamente; siendo que preserva mejor ciertas características sensoriales y químicas del jugo fresco, es decir, características como color, sabor, aroma y compuestos nutricionales (L. Niu et al., 2019).

Jugo de Mango

Guan y colaboradores (2016) aplicaron altas presiones de homogenización en jugo de mango, encontrando que los carotenoides y la capacidad antioxidante fue mayor aplicando esta tecnología en comparación con otros lotes tratados con pasteurización. Asimismo, el jugo fue conservado durante 60 días conservando atributos de color y sabor. Encina et al. (2013) evaluaron el efecto de la temperatura de pasteurización (90 °C/2 min) sobre la capacidad antioxidante lipofílica, esto resultó en una disminución de compuestos bioactivos debido al efecto de la temperatura sobre los carotenoides, que siguieron actuando sinérgicamente, pero con una disminución en su capacidad antioxidante.

En jugo de mango la aplicación de pulsos eléctricos es más efectiva cuando se tiene un pH bajo, alta conductividad eléctrica y un flujo turbulento a 30 y 40 °C (Ganapathy et al., 2019). También, su aplicación a 35kV/cm por 1800 μ s puede disminuir la población de mohos, levaduras y psicrófilos (Salinas-Roca et al., 2017). Por su parte, el plasma frío, al utilizar la configuración de barrera de descarga dieléctrica (DBD) a 25kV durante 10 minutos, puede reducir la actividad enzimática de la pulpa de mango que posteriormente puede ser utilizada para hacer jugo; se encontró una reducción en la actividad de polifenol oxidasa, peroxidasa y pectinmetilesterasa (Gamal et al., 2022).

En el caso del uso de ultrasonido, se han realizado investigaciones evaluando la vida útil del jugo de mango. Wang y colaboradores (2021) combinaron el uso de ultrasonido a 600W durante 10 minutos para luego irradiar con luz UV a una longitud de onda de 254 nm. Dentro de sus hallazgos encontraron que, durante 30 días de almacenamiento en frío, el jugo que tuvo un pretratamiento con ultrasonido y luz UV conservó de mejor manera sus características nutricionales que jugos frescos sin tratar. Asimismo, Wang y colaboradores (2020) revelaron como el ultrasonido a 600 W por 10 minutos y la posterior irradiación UV (254 nm) puede inactivar patógenos y también enzimas como polifenol oxidasa, peroxidasa y pectinmetilesterasa. Finalmente, también hay estudios con el uso de microondas a una potencia de 400 W por 3 minutos con lo que se pudo conservar el contenido de vitamina C y fenoles totales de la bebida fresca, manteniendo también su actividad antioxidante (Vu et al., 2022).

Jugo de Piña

Shaik y Chakraborty (2022) explican que el jugo de piña se pasteuriza comúnmente a 70-95 °C durante 0.5-5 minutos, pero esto tiene un efecto en sabor y fitoquímicos, dando la necesidad de controlar tratamientos con tiempo-temperatura intensos. Wu y colaboradores (2021) compararon la aplicación de alta presión hidrostática (500MPa/10min) con un tratamiento térmico (95 °C/3min), de manera general, el procesamiento de alta presión pudo retener mejor las cualidades del jugo de piña, como el color, componentes bioactivos, capacidad antioxidante y compuestos volátiles. Dhakal y

colaboradores (2018) compararon el contenido de ácido ascórbico en el jugo, donde el procesamiento a alta presión no alteró el contenido, pero el tratamiento combinado (presión-térmico) si lo degradó a medida que aumentaba la intensidad térmica.

Para el caso de pulsos eléctricos aplicados a jugo de piña se encontró una disminución de 5-log de mesófilos aerobios y levaduras; también ayudó a preservar su color, capacidad antioxidante y el contenido de vitamina C (Vollmer et al., 2020). El plasma frío también ha demostrado ser efectivo para la inhibición microbiana, donde con una configuración de barrera de descarga dieléctrica por 420 segundos causó una reducción de 8.2 log de *Enterococcus faecalis* (Sohbatzadeh et al., 2021). Por otro lado, el uso de plasma frío a 50 Hz en procesamiento jugo de piña ha demostrado mejorar el aroma de la bebida, y reducir aromas sulfurados (Porto et al., 2023).

Por último, hay estudios relacionados al uso de ultrasonido a una frecuencia de 24 kHz con un temperatura de 65 °C durante 2 minutos, donde Mala y colaboradores (2021) aplicaron el tratamiento en jugo de piña , logrando conservar parámetros nutricionales y de calidad, como el contenido fenólico total, ácido ascórbico y proteínas. Hernández (2023) aplicó una frecuencia de 60 W durante 5 minutos a temperatura de 25 °C, combinado con luz ultravioleta y en sus resultados se mostró control de enzimas como el polifenol oxidasa, peroxidasa y pectinmetilesterasa, al igual que un incremento en el contenido de fenoles totales y flavonoides; esto último gracias a las reacciones fotoquímicas de la luz ultravioleta.

Otros Estudios

En menor medida se han encontrado otras investigaciones referentes a jugos de otras frutas en los cuales Zhang y colaboradores (2011) evaluaron métodos convencionales y no convencionales para jugo de sandía, dentro de sus resultados el tratamiento que menos afectó los atributos de calidad fue la aplicación de alta presión. Este último tratamiento mantuvo color apropiado a sandia, viscosidad dinámica y la más alta concentración de licopeno.

Con jugo de maracuyá Laboissière y colaboradores (2007) evaluaron la calidad sensorial luego de tratarlo con altas presiones hidrostática versus la pasteurización convencional. En este estudio, llegaron a la conclusión que los valores obtenidos con el tratamiento de alta presión se asemejan a lotes de productos frescos. En un estudio de Uckoo et al. (2013), se evaluaron parámetros de calidad en jugo de toronja tratado con altas presiones, tratamiento térmico y un control (jugo fresco), encontrando que la alta presión mantuvo los compuestos bioactivos del jugo fresco.

Por otra parte, Wurlitzer y colaboradores (2019) realizaron un estudio del efecto de tratamientos térmicos en jugos de frutas tropicales. Los jugos fueron pasteurizados a 85 °C durante 30 segundos, de acuerdo con los resultados la pasteurización no afectó negativamente los componentes funcionales ni las propiedades sensoriales, pero la calidad sensorial y el contenido de ácido ascórbico si se redujo a través del tiempo de almacenamiento.

Conclusiones

Los tratamientos térmicos pueden afectar negativamente ciertos compuestos bioactivos, como vitaminas y antioxidantes, mientras que los métodos no térmicos pueden ser igual de eficientes y minimizan estas pérdidas. Sin embargo, la efectividad de cada método varía según el tipo de jugo y las condiciones del tratamiento, por lo que, es fundamental elegir la tecnología adecuada para cada caso.

Las tecnologías no tradicionales comparadas en esta revisión con la pasteurización convencional son emergentes, por lo que se necesita de equipo especializado para su escalabilidad a procesos industriales sin afectar su eficiencia.

Recomendaciones

Estudiar la combinación de métodos térmicos con no térmicos para evaluar su efectividad y maximizar la eficiencia en matrices alimenticias como la de los jugos.

Realizar un estudio económico comparando el uso de las tecnologías emergentes frente a la pasteurización convencional, identificando eficiencia en términos energéticos y rentabilidad para plantas procesadoras.

Elaborar estudios identificando diversos equipos especializados a nivel piloto en laboratorio para el uso de las tecnologías emergentes y evaluar su escalabilidad a procesos industriales.

Referencias

- Ağçam, E., Akyıldız, A. y Dündar, B. (2018). Thermal Pasteurization and Microbial Inactivation of Fruit Juices. En *Fruit Juices* (pp. 309–339). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802230-6.00017-5>
- Aguiar, S., Salazar, D., Jaramillo, R., Guacho, W. y Mancero, W. (2023). Tecnologías de conservación de alimentos tratados con altas presiones. *Reciena*, 3(2), 59–65. <https://reciena.esPOCH.edu.ec/index.php/reciena/article/view/107/154>
- Aguiló-Aguayo, I., Oms-Oliu, G., Soliva-Fortuny, R. y Martín-Belloso, O [Olga] (2009). Changes in quality attributes throughout storage of strawberry juice processed by high-intensity pulsed electric fields or heat treatments. *LWT - Food Science and Technology*, 42(4), 813–818. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2008.11.008>
- Ancos, B. de, Rodrigo, M. J., Sánchez-Moreno, C., Pilar Cano, M. y Zacarías, L. (2020). Effect of high-pressure processing applied as pretreatment on carotenoids, flavonoids and vitamin C in juice of the sweet oranges 'Navel' and the red-fleshed 'Cara Cara'. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 132, 109105. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109105>
- Andrés, V., Mateo-Vivaracho, L., Guillamón, E., Villanueva, M. J. y Tenorio, M. D. (2016). High hydrostatic pressure treatment and storage of soy-smoothies: Colour, bioactive compounds and antioxidant capacity. *LWT - Food Science and Technology*, 69, 123–130. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.01.033>
- Bevilacqua, A., Petrucci, L., Perricone, M., Speranza, B., Campaniello, D., Sinigaglia, M., et al. (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>
- Bhattacharjee, A. K., Tandon, D. K., Dikshit, A. y Kumar, S. (2011). Effect of pasteurization temperature on quality of aonla juice during storage. *Journal of Food Science and Technology*, 48(3), 269–273. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0171-5>
- Borras, J. (2020). *Optimización de la pasteurización de zumo de naranja mediante tratamiento térmico* [Tesis de postgrado]. Universidad Politécnica de Valencia, España. <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/157865/Borr%C3%A0s%20-%20Optimizaci%C3%B3n%20de%20la%20pasteurizaci%C3%B3n%20de%20zumo%20de%20naranja%20mediante%20tratamiento%20t%C3%A9rmico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bover-Cid, S., Belletti, N., Garriga, M. y Aymerich, T. (2011). Model for *Listeria monocytogenes* inactivation on dry-cured ham by high hydrostatic pressure processing. *Food Microbiology*, 28(4), 804–809. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2010.05.005>
- Briongos, H., Illera, A. E., Sanz, M. T., Melgosa, R., Beltrán, S. y Solaesa, A. G. (2016). Effect of high pressure carbon dioxide processing on pectin methylesterase activity and other orange juice properties. *LWT - Food Science and Technology*, 74, 411–419. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.07.069>
- Buvé, C., Kebede, B. T., Batselier, C. de, Carrillo, C., Pham, H. T., Hendrickx, M., Grauwet, T. y van Loey, A. (2018). Kinetics of colour changes in pasteurised strawberry juice during storage. *Journal of Food Engineering*, 216, 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.002>

- Caballero-Figueroa, E., Terrés, E., Hernández-Hernández, H. M. y Escamilla-García, M. (2022). Revisión sobre las tecnologías emergentes no térmicas para el procesamiento de alimentos. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 25. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.459>
- Cárdenas, G., Arrazola, G. y Villalba, M. (2015). Frutas tropicales: fuente de compuestos bioactivos naturales en la industria de alimentos. *Ingenium*, 17(33), 29–40. <https://revistas.usb.edu.co/index.php/Ingenium/article/view/2152/1884>
- Chakraborty, S. y Shaik, L. (2023). Influence of matrix pH on batch thermal pasteurization of sweet lime juice: Global kinetic models for *Saccharomyces cerevisiae* and polyphenol oxidase inactivation and degradation of vitamin C. *Journal of Food Process Engineering*, 46(12), Artículo e14437. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14437>
- Chemat, F., Zill-e-Huma y Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18(4), 813–835. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023>
- Cheng, C., Jia, M., Gui, Y. y Ma, Y [Yaqin] (2020). Comparison of the effects of novel processing technologies and conventional thermal pasteurisation on the nutritional quality and aroma of Mandarin (Citrus unshiu) juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102425. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102425>
- Cherbański, R. y Rudniak, L. (2013). Modelling of microwave heating of water in a monomode applicator – Influence of operating conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 74, 214–229. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.07.001>
- Chizoba Ekezie, F.-G., Sun, D.-W. y Cheng, J.-H. (2017). A review on recent advances in cold plasma technology for the food industry: Current applications and future trends. *Trends in Food Science & Technology*, 69, 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.08.007>
- Cruz, R. M., Vieira, M. C. y Silva, C. L. (2006). Effect of heat and thermosonication treatments on peroxidase inactivation kinetics in watercress (*Nasturtium officinale*). *Journal of Food Engineering*, 72(1), 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.11.007>
- Dhakal, S., Balasubramaniam, V. M., Ayvaz, H. y Rodriguez-Saona, L. E. (2018). Kinetic modeling of ascorbic acid degradation of pineapple juice subjected to combined pressure-thermal treatment. *Journal of Food Engineering*, 224, 62–70. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.12.016>
- Dhar, R., Basak, S. y Chakraborty, S. (2022). Pasteurization of fruit juices by pulsed light treatment: A review on the microbial safety, enzymatic stability, and kinetic approach to process design. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(1), 499–540. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12864>
- Domínguez, L. (2013). Presión hidrostática ultra alta, usos y perspectivas en las ciencias biológicas y de la salud. *Revista Especializada En Ciencias De La Salud*, 2(16), 55–61. <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=52211>
- Dubrović, I., Herceg, J., Badanjak, M. y Dragović, U. (2011). Effect of High Intensity Ultrasound and Pasteurization on Anthocyanin Content in Strawberry Juice. *Food Technology and Biotechnology*, 49, 196–204.

- Encina, C., Bernal, A. y Rojas, D. (2013). Efecto de la temperatura de pasteurización y proporción de mezclas binarias de pulpa de carambola y mango sobre su capacidad antioxidante lipofílica. *Ingeniería Industrial*(31), 197–219. <https://www.redalyc.org/pdf/3374/337430545009.pdf>
- Eom, S. J., Zu, H. D., Lee, J., Kang, M.-C., Park, J., Song, K.-M. y Lee, N. H. (2021). Development of an ultrasonic system for industrial extraction of unheated sesame oil cake. *Food Chemistry*, 354, 129582. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129582>
- Fabroni, S., Platania, G. M., Amenta, M., Ballistreri, G., Galvano, F., Nges, I. A. y Timpanaro, N. (2024). Pulsed Electric Field as a Mild Treatment for Extended Shelf-Life and Preservation of Bioactive Compounds in Blood Orange Juice. *Applied Sciences*, 14(16), 7275. <https://doi.org/10.3390/app14167275>
- The Food Tech. (2024). *La industria de jugos en Latinoamérica: un mercado en constante evolución*. The Food Tech. <https://thefoodtech.com/tendencias-de-consumo/la-industria-de-jugos-en-latinoamerica-un-mercado-en-constante-evolucion/>
- Fu, X., Belwal, T., Cravotto, G. y Luo, Z. (2020). Sono-physical and sono-chemical effects of ultrasound: Primary applications in extraction and freezing operations and influence on food components. *Ultrasonics Sonochemistry*, 60, 104726. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104726>
- Gamal, T., Ali, M. y Shokrollahi, B. (2022). The Effect of Cold Plasma on the Enzymatic Activity and Quality Characteristics of Mango Pulp. *Research and Innovation in Food Science and Technology*, 10(4), 341–350. https://journals.rifst.ac.ir/article_122586.html
- Gamboa Santos, J., Rodríguez, J [Johanna], Carvajal, G. y Pilamala, A. (2016). Aplicación de tecnologías emergentes al procesamiento de frutas con elevada calidad nutricional. – Una revisión. *Revista Colombiana De Investigaciones Agroindustriales*, 3, 57. <https://doi.org/10.23850/24220582.361>
- Ganapathy, S., Raja, P., Vijayakumary, P. y Venkatasami, M. (2019). Effect of physical properties of mango juice on the effectiveness of pulsed electric field treatment. ~ 691 ~ *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(6), 691–696. https://www.researchgate.net/publication/340088937_Effect_of_physical_properties_of_mango_juice_on_the_effectiveness_of_pulsed_electric_field_treatment
- García, E. (2016). La tecnología de pulsos eléctricos. *Nanobio*, 1, 129–138. https://ciatej.mx/files/el_ciatej/comunicacion/divulgacion/compuestos_bioactivos.pdf#page=136
- Gemina. (2017). *Pasteurizadores de placas*. Gemina. https://www.gemina.es/files/catalogue/pdf/13_Pasteurizadores_de_placas.pdf
- Gharibzahedi, S. M. T., Hernández-Ortega, C., Welte-Chanes, J [Jorge], Putnik, P., Barba, F. J., Mallikarjunan, K., Escobedo-Avellaneda, Z. y Roohinejad, S. (2019). High pressure processing of food-grade emulsion systems: Antimicrobial activity, and effect on the physicochemical properties. *Food Hydrocolloids*, 87, 307–320. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.08.012>
- Guan, Y., Zhou, L., Bi, J., Yi, J., Liu, X., Chen, Q., Wu, X. y Zhou, M. (2016). Change of microbial and quality attributes of mango juice treated by high pressure homogenization combined with moderate inlet temperatures during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 36, 320–329. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.07.009>

- Guo, M., Jin, T. Z., Geveke, D. J., Fan, X., Sites, J. E. y Wang, L. (2014). Evaluation of Microbial Stability, Bioactive Compounds, Physicochemical Properties, and Consumer Acceptance of Pomegranate Juice Processed in a Commercial Scale Pulsed Electric Field System. *Food and Bioprocess Technology*, 7(7), 2112–2120. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1185-6>
- Guo, Q., Sun, D.-W., Cheng, J.-H. y Han, Z. (2017). Microwave processing techniques and their recent applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 236–247. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.07.007>
- Hernández, J. (2023). *Efecto del tratamiento por irradiación UV-C y ultrasonido sobre los fenoles y actividad enzimática de jugo de piña* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Autónoma de México, México. <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000834978/3/0834978.pdf>
- Herrera, J. (2024). Aplicación de nuevas tecnologías y su efecto en los compuestos bioactivos de frutas y sus derivados: un estudio de revisión. *FocuScience*, 2(3), 72–83. <https://focuscience.com/wp-content/uploads/2024/12/6-APLICACIONDENUEVASTECNOLOGIASYSUEFECTOENLOSCOMPUESTOSBIOACTIVOSDEFRUTASYUSDERIVADOS.UNESTUDIODEREVISION.pdf>
- Herrera Chalé, F., Betancur Ancona, D. y Segura Campos, M. R. (2014). Compuestos bioactivos de la dieta con potencial en la prevención de patologías relacionadas con sobrepeso y obesidad; péptidos biológicamente activos [Dietary bioactive compounds with potential in preventing pathologies related with overweight and obesity;biologically active peptides]. *Nutricion hospitalaria*, 29(1), 10–20. <https://doi.org/10.3305/nh.2014.29.1.6990>
- Herrero, A. y Romero de Avila, M. (2006). Innovaciones en el procesado de alimentos: Tecnologías no térmicas. *Revista Médica De La Universidad De Navarra*, 50(4), 71–74. <https://revistas.unav.edu/index.php/revista-de-medicina/article/view/7633/6687>
- Hommak. (2023). *Pasteurizador*. Hommak. <https://hommakusa.com/es/hommak-productos/pasteurizador/>
- Huang, H.-W., Hsu, C.-P. y Wang, C.-Y. (2020). Healthy expectations of high hydrostatic pressure treatment in food processing industry. *Journal of Food and Drug Analysis*, 28(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2019.10.002>
- Jermann, C., Koutchma, T., Margas, E., Leadley, C. y Ros-Polski, V. (2015). Mapping trends in novel and emerging food processing technologies around the world. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 31, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.06.007>
- Jiang, H., Liu, Z. y Wang, S. (2018). Microwave processing: Effects and impacts on food components. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 58(14), 2476–2489. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1319322>
- Jiménez-Colmenero, F. (2013). Emulsiones múltiples; compuestos bioactivos y alimentos funcionales [Multiple emulsions; bioactive compounds and functional foods]. *Nutricion hospitalaria*, 28(5), 1413–1421. <https://doi.org/10.3305/nh.2013.28.5.6673>
- Karacam, C. H., Sahin, S. y Oztop, M. H. (2015). Effect of high pressure homogenization (microfluidization) on the quality of Ottoman Strawberry (F. Ananassa) juice. *LWT - Food Science and Technology*, 64(2), 932–937. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.06.064>

- Khandpur, P. y Gogate, P. R. (2015). Understanding the effect of novel approaches based on ultrasound on sensory profile of orange juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 27, 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.05.001>
- Kubar, M., Miano, T., Miano y Tanveer (2018). Influence of Juice Extraction Methods on Physicochemical and Sensory Properties of Citrus Fruit Juice. *EC Agriculture*, 4(1), 50–61. https://www.researchgate.net/publication/332593528_Influence_of_Juice_Extraction_Methods_on_Physicochemical_and_Sensory_Properties_of_Citrus_Fruit_Juice
- Laboissière, L., Deliza, R., Barros-Marcellini, A. M., Rosenthal, A., Camargo, L. y Junqueira, R. G. (2007). Effects of high hydrostatic pressure (HHP) on sensory characteristics of yellow passion fruit juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 8(4), 469–477. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.04.001>
- Lv, W., Li, D [Dong], Lv, H., Jin, X., Han, Q., Su, D. y Wang, Y. (2019). Recent development of microwave fluidization technology for drying of fresh fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.047>
- Mala, T., Sadiq, M. B. y Anal, A. K. (2021). Optimization of thermosonication processing of pineapple juice to improve the quality attributes during storage. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(5), 4325–4335. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01011-8>
- Manzocco, L., Plazzotta, S., Spilimbergo, S. y Nicoli, M. C. (2017). Impact of high-pressure carbon dioxide on polyphenoloxidase activity and stability of fresh apple juice. *LWT - Food Science and Technology*, 85, 363–371. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.11.052>
- Market Research Company in Latin America Regions. (2023). *Mercado de Frutas, Análisis, Informe 2024-2032*. Informe de Expertos. <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-jugo-de-frutas>
- Marszałek, K., Mitek, M. y Skąpska, S. (2015). Effect of Continuous Flow Microwave and Conventional Heating on the Bioactive Compounds, Colour, Enzymes Activity, Microbial and Sensory Quality of Strawberry Purée. *Food and Bioprocess Technology*, 8(9), 1864–1876. <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1543-7>
- Marszałek, K., Skąpska, S., Woźniak, Ł. y Sokołowska, B. (2015). Application of supercritical carbon dioxide for the preservation of strawberry juice: Microbial and physicochemical quality, enzymatic activity and the degradation kinetics of anthocyanins during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 32, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.10.005>
- Martinez Giron, J., Figueroa Sepúlveda, K. y Castillo Robles, N. Z. (2021). Aplicación de altas presiones y otras tecnologías en frutas como alternativa de tratamientos térmicos convencionales. *Biotecnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 19(2), 271–285. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1772>
- Martins, C. P. C., Cavalcanti, R. N., Cardozo, T. S. F., Couto, S. M., Guimarães, J. T., Balthazar, C. F., Rocha, R. S., Pimentel, T. C., Freitas, M. Q., Raices, R. S. L., Silva, M. C., Esmerino, E. A., Granato, D. y Cruz, A. G. (2021). Effects of microwave heating on the chemical composition and bioactivity of orange juice-milk beverages. *Food Chemistry*, 345, 128746. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128746>

- Mehta, D. y Yadav, S. K. (2020). Impact of atmospheric non-thermal plasma and hydrothermal treatment on bioactive compounds and microbial inactivation of strawberry juice: A hurdle technology approach. *Food Science and Technology International = Ciencia Y Tecnología De Los Alimentos Internacional*, 26(1), 3–10. <https://doi.org/10.1177/1082013219865360>
- Monhemi, H. y Dolatabadi, S. (2020). Molecular dynamics simulation of high-pressure CO₂ pasteurization reveals the interfacial denaturation of proteins at CO₂/water interface. *Journal of CO₂ Utilization*, 35, 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.10.004>
- Mordor Intelligence. (2023). *Tamaño del mercado de frutas y verduras y análisis de participación, tendencias de crecimiento y pronósticos (2024-2029)*. <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/fruit-and-vegetable-juice-market-industry>
- Niu, D., Zeng, X.-A., Ren, E.-F., Xu, F.-Y., Li, J., Wang, M.-S. y Wang, R. (2020). Review of the application of pulsed electric fields (PEF) technology for food processing in China. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 137, 109715. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109715>
- Niu, L [Liyang], Li, D [Dajing], Liu, C., Huang, W. y Liao, X. (2019). Quality Changes of Orange Juice after DPCD Treatment. *Journal of Food Quality*, 2019, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2019/6897583>
- Ogbeide, U., Karaki, H. y Okeri, H. (2020). Evaluation of the pH, titratable acidity and ascorbic acid content of juices commonly consumed by children. *Journal of Pharmaceutical and Allied Sciences*, 17(3). <https://www.ajol.info/index.php/jophas/article/view/200248>
- Okyere, A. Y., Rajendran, S. y Annor, G. A. (2022). Cold plasma technologies: Their effect on starch properties and industrial scale-up for starch modification. *Current Research in Food Science*, 5, 451–463. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.02.007>
- Ortiz, Y. y Pinchao, Y. (2012). *Evaluación de los efectos de la pasteurización sobre la inactivación de la enzima pectinmetilesterasa y las características fisicoquímicas y sensoriales de zumo de uchuva (Physalis peruviana L.)* [Tesis de pregrado]. Universidad de Nariño, Nariño, Colombia. <https://sired.udenar.edu.co/5033/1/85583.pdf>
- Ozen, E. y Singh, R. K. (2020). Atmospheric cold plasma treatment of fruit juices: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 103, 144–151. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.07.020>
- Paniwnyk, L. (2017). Applications of ultrasound in processing of liquid foods: A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 38, 794–806. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.12.025>
- Pankaj, S. K. y Keener, K. M. (2017). Cold plasma: background, applications and current trends. *Current Opinion in Food Science*, 16, 49–52. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.07.008>
- Pankaj, S. K., Wan, Z. y Keener, K. M. (2018). Effects of Cold Plasma on Food Quality: A Review. *Foods (Basel, Switzerland)*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/foods7010004>
- Perdomo Lamilla, C., Vaudagna, S. R., Cap, M. y Rodriguez, A. (2020). Application of high pressure-assisted infusion treatment to mango pieces: Effect on quality properties. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 64, 102431. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102431>
- Pérez-Lavalle, L., Carrasco, E. y Valero, A. (2020). Strategies for Microbial Decontamination of Fresh Blueberries and Derived Products. *Foods (Basel, Switzerland)*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/foods9111558>

- Picart-Palmade, L., Cunault, C., Chevalier-Lucia, D., Belleville, M.-P. y Marchesseau, S. (2018). Potentialities and Limits of Some Non-thermal Technologies to Improve Sustainability of Food Processing. *Frontiers in Nutrition*, 5, 130. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00130>
- Porto, E., Alves Filho, E. G., Silva, L. M. A., Fonteles, T. V., do Nascimento, R. B. R., Fernandes, F. A. N., Brito, E. S. de [Edy Sousa] y Rodrigues, S. (2020). Ozone and plasma processing effect on green coconut water. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 131, 109000. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109000>
- Porto, E. C. M., Brito, E. S. de [Edy S.], Rodrigues, S. y Fernandes, F. A. N. (2023). Effect of Atmospheric Cold Plasma on the Aroma of Pineapple Juice: Improving Fresh and Fruity Notes and Reducing Undesired Pungent and Sulfurous Aromas. *Processes*, 11(8), 2303. <https://doi.org/10.3390/pr11082303>
- Priyadarshini, A., Rajauria, G., O'Donnell, C. P. y Tiwari, B. K. (2019). Emerging food processing technologies and factors impacting their industrial adoption. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(19), 3082–3101. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1483890>
- Puente-Díaz, L. (2024). Principios, aplicaciones y efectos de la aplicación de plasma frío en alimentos: una revisión actualizada. *Revista Chilena De Nutrición*, 51(2), 155–164. <https://doi.org/10.4067/s0717-75182024000200155>
- Ramos, J. (2023). *Aplicaciones tecnológicas de la pasteurizadora de placas en procesos de transformación agroindustrial* [Tesis de pregrado]. Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador. <https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/12ea8e5e-836a-4cd5-a0eb-77fbe4d02754/content>
- Rios-Corripio, G., Welte-Chanes, J [Jorge], Rodríguez-Martínez, V. y Guerrero-Beltrán, J. Á. (2020). Influence of high hydrostatic pressure processing on physicochemical characteristics of a fermented pomegranate (*Punica granatum L.*) beverage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 59, 102249. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102249>
- Rodríguez, J [J.], Florido, A. y Hernández, M. (2020). Determinación de parámetros fisicoquímicos en jugos de frutas cítricas. *Investigación Y Desarrollo En Ciencia Y Tecnología De Alimentos*, 5, 233–238. <http://eprints.uanl.mx/23524/1/23.pdf>
- Roobab, U., Abida, A., Chacha, J. S., Athar, A., Madni, G. M., Ranjha, M. M. A. N., Rusu, A. V., Zeng, X.-A., Aadil, R. M. y Trif, M. (2022). Applications of Innovative Non-Thermal Pulsed Electric Field Technology in Developing Safer and Healthier Fruit Juices. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 27(13). <https://doi.org/10.3390/molecules27134031>
- Roobab, U., Madni, G. M., Ranjha, M. M. A. N., Khan, A. W., Selim, S., Almuhayawi, M. S., Samy, M., Zeng, X.-A. y Aadil, R. M. (2023). Applications of water activated by ozone, electrolysis, or gas plasma for microbial decontamination of raw and processed meat. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, Artículo 1007967. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1007967>
- Ruiz, P. (2017). *Conservación de alimentos por altas presiones hidrostáticas* [Tesis de pregrado]. Universidad Complutense, Madrid, España. <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/dd1787c3-7e00-43ea-9dfe-1166df6714ad/content>

- Salehi, F. (2020). Physico-chemical properties of fruit and vegetable juices as affected by ultrasound: a review. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1748–1765. <https://doi.org/10.1080/10942912.2020.1825486>
- Salinas-Roca, B., Elez-Martínez, P., Welti-Chanes, J [J.] y Martín-Belloso, O [O.] (2017). Quality Changes in Mango Juice Treated by High-Intensity Pulsed Electric Fields Throughout the Storage. *Food and Bioprocess Technology*, 10(11), 1970–1983. <https://doi.org/10.1007/s11947-017-1969-1>
- Sánchez, R. (2024). Avances y aplicaciones de las tecnologías no térmicas en el procesamiento de alimentos. *Revista De Ingeniería En Industrias Alimentarias*, 1(2), 6–9. https://revistaiia.mx/documentos/2024_02_Completo.pdf#page=14
- Shaik, L. y Chakraborty, S. (2022). Nonthermal pasteurization of pineapple juice: A review on the potential of achieving microbial safety and enzymatic stability. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(6), 4716–4737. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13042>
- Shi, X. M., Zhang, G. J., Wu, X. L., Li, Y. X., Ma, Y., & Shao, X. J. (2011). Effect of low- temperature plasma on microorganism inactivation and quality of freshly squeezed orange juice. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39(7), 1591–1597. <https://doi.org/10.1109/TPS.2011.2142012>
- Sohbatzadeh, F., Yazdanshenas, H., Soltani, A.-H. y Shabannejad, A. (2021). An innovative strategy to rapidly inactivate 8.2-log *Enterococcus faecalis* in fresh pineapple juice using cold atmospheric plasma. *Scientific Reports*, 11(1), 16010. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95452-2>
- Soria, A. C., Corzo-Martínez, M., Montilla, A., Riera, E., Gamboa-Santos, J. y Villamiel, M. (2010). Chemical and physicochemical quality parameters in carrots dehydrated by power ultrasound. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(13), 7715–7722. <https://doi.org/10.1021/jf100762e>
- Stinco, C. M., Sentandreu, E., Mapelli-Brahm, P., Navarro, J. L., Vicario, I. M. y Meléndez-Martínez, A. J. (2020). Influence of high pressure homogenization and pasteurization on the in vitro bioaccessibility of carotenoids and flavonoids in orange juice. *Food Chemistry*, 331, 127259. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127259>
- Sultani, T. M., Francisco, A. C. P., Dacanal, G. C., Oliveira, A. L. de y Petrus, R. R. (2025). The combined effect of supercritical carbon dioxide and mild temperatures on pectin methylesterase inactivation in orange juice. *Food Science and Technology International = Ciencia Y Tecnología De Los Alimentos Internacional*, 31(1), 36–47. <https://doi.org/10.1177/10820132231172363>
- Thirumdas, R., Sarangapani, C. y Annature, U. S. (2015). Cold Plasma: A novel Non-Thermal Technology for Food Processing. *Food Biophysics*, 10(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s11483-014-9382-z>
- Tirado-Kulieva, V., Miranda Zamora, W. R. y Leyva Povis, N. L. (2021). Revista de la Universidad del Zulia, Volumen 12, Número 32. *Revista De La Universidad Del Zulia*, 12(32), 284–316. <https://doi.org/10.46925//rdluz.32.18>
- Toledo, M. (2016). *Conservación de alimentos mediante tratamientos por alta presión hidrostática* [Tesis doctoral]. Universidad de Jaén, Jaén, España. <https://ruja.ujaen.es/bitstream/10953/741/1/9788416819348.pdf>
- Uckoo, R. M., Jayaprakasha, G. K., Somerville, J. A., Balasubramaniam, V. M., Pinarte, M. y Patil, B. S. (2013). High pressure processing controls microbial growth and minimally alters the levels of

- health promoting compounds in grapefruit (*Citrus paradisi* Macfad) juice. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 18, 7–14. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.11.010>
- Villareal, Y., Mejía, D., Osorio, O. y Cerón, A. (2013). Efecto de pasteurización sobre características sensoriales y contenido de vitamina C en jugos de frutas, 11(2), 66–75. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v11n2/v11n2a08.pdf>
- Vivanco, D., Ardiles, P., Castillo, D. y Puente, L. (2021). Tecnología emergente: Campo de pulsos eléctricos (PEF) para el tratamiento de alimentos y su efecto en el contenido de antioxidantes. *Revista Chilena De Nutrición*, 48(4), 609–619. <https://doi.org/10.4067/S0717-75182021000400609>
- Vollmer, K., Chakraborty, S., Bhalerao, P. P., Carle, R., Frank, J. y Steingass, C. B. (2020). Effect of Pulsed Light Treatment on Natural Microbiota, Enzyme Activity, and Phytochemical Composition of Pineapple (*Ananas comosus* [L.] Merr.) juice. *Food and Bioprocess Technology*, 13(7), 1095–1109. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02460-7>
- Vu, Q. M., van Pham, T., Do, V. L., Long, T. B., Trang, N. T. T., Duy, N. Q. y Nhan, N. P. T. (2022). Production Process of a Nutritional Drink from Mango (*Mangifera indica*). *Materials Science Forum*, 1048, 502–513. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1048.502>
- Waghmare, R. (2021). Cold plasma technology for fruit based beverages: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.018>
- Wahia, H., Zhou, C., Fakayode, O. A., Amanor-Atiemoh, R., Zhang, L., Taiye Mustapha, A., Zhang, J., Xu, B., Zhang, R. y Ma, H. (2021). Quality attributes optimization of orange juice subjected to multi-frequency thermosonication: Alicyclobacillus acidoterrestris spore inactivation and applied spectroscopy ROS characterization. *Food Chemistry*, 361, 130108. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130108>
- Wang, J., Liu, Q., Xie, B. y Sun, Z. (2020). Effect of ultrasound combined with ultraviolet treatment on microbial inactivation and quality properties of mango juice. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64, 105000. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105000>
- Wang, J., Xie, B. y Sun, Z. (2021). Quality parameters and bioactive compound bioaccessibility changes in probiotics fermented mango juice using ultraviolet-assisted ultrasonic pre-treatment during cold storage. *LWT - Food Science and Technology*, 137, 110438. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110438>
- Wu, W., Xiao, G., Yu, Y., Xu, Y [Yujuan], Wu, J., Peng, J. y Li, L. (2021). Effects of high pressure and thermal processing on quality properties and volatile compounds of pineapple fruit juice. *Food Control*, 130, 108293. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108293>
- Wu, Y., Mu, R., Li, G., Li, M. y Lv, W. (2022). Research progress in fluid and semifluid microwave heating technology in food processing. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(4), 3436–3454. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12978>
- Wurlitzer, N. J., Dionísio, A. P., Lima, J. R., Garruti, D. D. S., Da Silva Araújo, I. M., Da Rocha, R. F. J. y Maia, J. L. (2019). Tropical fruit juice: Effect of thermal treatment and storage time on sensory and functional properties. *Journal of Food Science and Technology*, 56(12), 5184–5193. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03987-0>

- Xu, F., Feng, X., Sui, X., Lin, H. y Han, Y. (2017). Inactivation mechanism of *Vibrio parahaemolyticus* via supercritical carbon dioxide treatment. *Food Research International (Ottawa, Ont.)*, 100(Pt 2), 282–288. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.08.038>
- Yildiz, S., Pokhrel, P. R., Unluturk, S. y Barbosa-Cánovas, G. V. (2019). Identification of equivalent processing conditions for pasteurization of strawberry juice by high pressure, ultrasound, and pulsed electric fields processing. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 57, 102195. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102195>
- Yildiz, S., Pokhrel, P. R., Unluturk, S. y Barbosa-Cánovas, G. V. (2021). Changes in Quality Characteristics of Strawberry Juice After Equivalent High Pressure, Ultrasound, and Pulsed Electric Fields Processes. *Food Engineering Reviews*, 13(3), 601–612. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09250-z>
- Yu, T., Niu, L [Liyuan] y Iwahashi, H. (2020). High-Pressure Carbon Dioxide Used for Pasteurization in Food Industry. *Food Engineering Reviews*, 12(3), 364–380. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09240-1>
- Zhang, C., Trierweiler, B., Li, W., Butz, P., Xu, Y [Yong], Rüfer, C. E., Ma, Y [Yue] y Zhao, X. (2011). Comparison of thermal, ultraviolet-c, and high pressure treatments on quality parameters of watermelon juice. *Food Chemistry*, 126(1), 254–260. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.013>
- Zhang, M., Jiang, H. y Lim, R.-X. (2010). Recent Developments in Microwave-Assisted Drying of Vegetables, Fruits, and Aquatic Products—Drying Kinetics and Quality Considerations. *Drying Technology*, 28(11), 1307–1316. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.524591>
- Zhang, S., Yang, R., Zhao, W., Liang, Q. y Zhang, Z. (2011). The first ESR observation of radical species generated under pulsed electric fields processing. *LWT - Food Science and Technology*, 44(4), 1233–1235. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.11.016>