

Plasma frío como herramienta emergente: aplicaciones en alimentos.

Cold plasma as an emerging tool: applications in food.

Mariela Rodríguez* (1).

Department of Food & Human Nutritional Sciences, The University of Manitoba. Richardson Centre for Functional Foods & Nutraceuticals. 196, Innovation Drive, Winnipeg, MB, Canada.

mariela.rodriguez@umanitoba.ca.

*corresponding author.

Artículo recibido en octubre 02, 2025; aceptado en octubre 08, 2025.

Resumen.

El plasma frío es una tecnología no térmica emergente que está ganando atención en múltiples campos, especialmente en el procesamiento de alimentos, por su capacidad para mejorar la seguridad y la calidad mientras preserva las propiedades sensoriales. Esta tecnología permite la inactivación microbiana, la degradación de plaguicidas y micotoxinas, y la inactivación enzimática para prevenir cambios indeseables como el pardeamiento y la pérdida de nutrientes. Además, modifica la estructura de las proteínas para reducir la alergenicidad y mejorar la digestibilidad. La eficacia del plasma frío depende de parámetros operativos como el voltaje, el tiempo de exposición y la composición del gas. Como alternativa sostenible, extiende la vida útil, reduce contaminantes y responde a la demanda del consumidor de alimentos seguros y mínimamente procesados.

Palabras clave: Aplicaciones en procesamiento de alimentos, chorro de plasma, descarga de barrera dieléctrica, plasma frío.

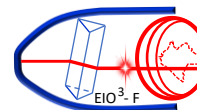
Abstract.

Cold plasma is an emerging non-thermal technology gaining attention across multiple fields, particularly in food processing, for its ability to enhance safety and quality while preserving sensory attributes. This technology enables microbial inactivation, degradation of pesticides and mycotoxins, and enzyme inactivation to prevent undesirable changes such as browning and nutrient loss. It also modifies protein structures to reduce allergenicity and improve digestibility. The effectiveness of cold plasma depends on operational parameters such as voltage, exposure time, and gas composition. As a sustainable alternative, it extends shelf life, reduces contaminants, and meets consumer demand for safe, minimally processed foods.

Keywords: Cold plasma, dielectric barrier discharge, food processing applications, plasma jet.

1. Descripción de la conferencia.

La tecnología de limpieza por plasma se ha consolidado como un enfoque revolucionario en el tratamiento de superficies, al ofrecer una alternativa sin contacto, no destructiva y respetuosa con el medio ambiente frente a los métodos tradicionales. (Pankaj et al., 2018) En esta conferencia se abordarán los fundamentos de la generación de plasma frío, así como una selección de formatos de excitación utilizados en esta tecnología. Se presentará una revisión



integral de los mecanismos, factores que influyen y aplicaciones de las tecnologías de limpieza y modificación de superficies por plasma. Posteriormente, se explorarán algunas de las múltiples aplicaciones de esta tecnología en sectores como la medicina en agricultura, la industria textil, la conservación del patrimonio cultural y la electrónica, donde se utiliza para limpiar componentes delicados, tratar superficies metálicas y mantener dispositivos ópticos y semiconductores.(Nwabor et al., 2022; Sun et al., 2025)

Finalmente, se hará foco en su creciente uso en la industria alimentaria, donde el plasma frío se presenta como una alternativa innovadora a los métodos térmicos convencionales como la pasteurización, esterilización, UHT, horneado, fritura, secado y evaporación que, si bien eficaces, pueden provocar pérdida de nutrientes, alteraciones en el sabor y color, y daños en la textura. (Knorr & Augustin, 2021) Ante estas limitaciones, los consumidores demandan alimentos con características más frescas, lo que ha impulsado la adopción de tecnologías verdes como el plasma frío para mejorar la seguridad alimentaria y extender la vida útil de los productos.(Cherif et al., 2023)

2.1. A qué llamamos Plasma.

El plasma representa el cuarto estado de la materia, distinto de los estados convencionales sólido, líquido y gaseoso. Recordemos que los sólidos, con sus partículas compactas dispuestas en un patrón geométrico fijo, mantienen una forma y un volumen definidos. Los líquidos, aunque también están compuestos por partículas compactas, presentan fluidez, lo que les permite adaptarse a la forma de su recipiente y conservar un volumen definido. Por otro lado, los gases poseen partículas más dispersas que se mueven libremente, lo que les confiere una forma y un volumen indefinidos, ya que se expanden hasta llenar todo el recipiente.(Chang & College, 2002) En cambio, el plasma surge cuando las moléculas o átomos gaseosos pierden electrones, lo que da lugar a una mezcla que engloba iones positivos, electrones libres y partículas neutras, todos los cuales mantienen colectivamente la neutralidad eléctrica. Los procesos de interconversión entre los cuatro estados de la materia se representan en la **Fig. 1**. El grado de ionización puede variar desde el 100 % (gases totalmente ionizados) hasta valores muy bajos (p. ej., 10^{-4} – 10^{-6} ; gases parcialmente ionizados).(Bogaerts et al., 2002) La ionización transforma un gas en plasma, mientras que la desionización permite que el plasma vuelva a convertirse en moléculas gaseosas. El plasma alcanza temperaturas de miles a millones de grados, lo que refleja su alta energía cinética y velocidad. Está presente en laboratorios, aplicaciones cotidianas y el cosmos, como el Sol, cuya temperatura central es de 15 millones de grados Celsius. La fusión nuclear mantiene su estado, y también se manifiesta en la atmósfera terrestre y en lámparas fluorescentes y de neón. La generación de plasma se puede lograr mediante diversos métodos, entre los que se incluyen la ionización por descarga, la ionización térmica, la fotoionización y la ionización por radiación. (Sun et al., 2025).

En el estado de plasma, las moléculas se disocian en sus elementos atómicos, perdiendo electrones y adquiriendo un estado de energía más alto. La eficacia de la tecnología de plasma depende de factores como la energía, definida por la presión, la temperatura, el equilibrio termodinámico entre las partículas, y el tipo de gas utilizado. Aunque la inducción de plasma requiere una energía suficientemente alta, los avances recientes en física de plasma han permitido generar “plasma frío” a temperaturas ambiente y presiones atmosféricas.(Nwabor et al., 2022)

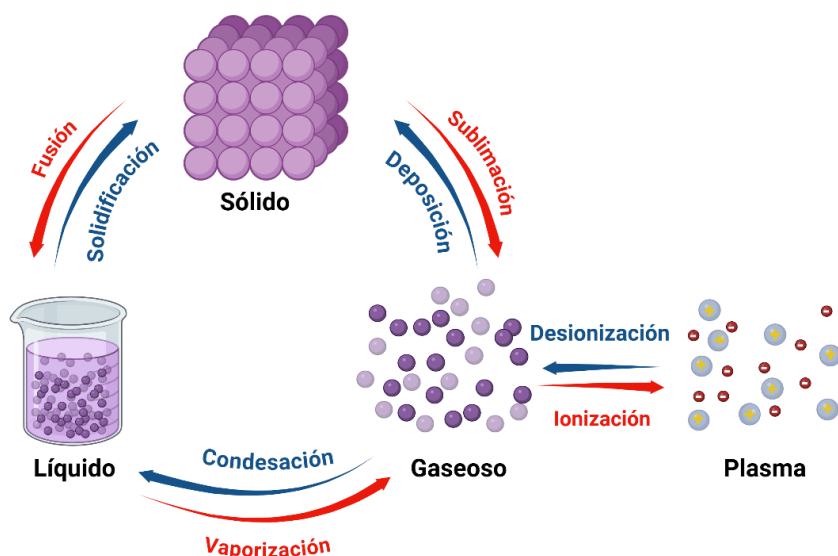
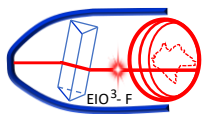


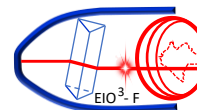
Figura 1. Transición entre los cuatro estados de la materia.

2.2. Clasificación del plasma.

En general, los plasmas pueden subdividirse entre plasmas que están en equilibrio térmico (**plasma térmico**) y aquellos que no lo están (**plasma no térmico o "frío"**). En plasmas térmicos, la temperatura de todas las especies (electrones, iones, especies neutras) es la misma, es decir, existe un equilibrio termodinámico entre electrones y otras especies, esto es, el flujo de energía de los electrones a las partículas pesadas equilibra el flujo de energía de las partículas pesadas al entorno solo cuando la temperatura de las partículas pesadas se vuelve casi igual a la temperatura de los electrones. En todos los plasmas soportados por un campo eléctrico, los electrones reciben la energía externa mucho más rápido que los iones mucho más pesados y tienen la oportunidad de calentarse a varios miles de grados antes de que su entorno se caliente. En el plasma no térmico (frío), el enfriamiento de los iones y las moléculas sin carga es más eficaz que la transferencia de energía de los electrones y el gas permanece a baja temperatura. Por esta razón, el plasma no térmico también se denomina plasma de no equilibrio. (Bogaerts et al., 2002; Fridman et al., 2008) Anteriormente, los plasmas fríos se generaban únicamente en condiciones de baja presión. Sin embargo, los avances recientes en la física e ingeniería de plasmas han permitido la generación de plasmas fríos a presión atmosférica, lo que ha impulsado significativamente la investigación sobre plasmas en la interfaz de las ciencias de la vida. (Segat et al., 2016) El diseño y el control de fuentes de plasma que operan a presión atmosférica o cercana a ella resultan de interés, tanto técnico como comercial, para la industria alimentaria, ya que no requieren condiciones de procesamiento extremas, como altas temperaturas y presiones (Misra et al., 2016).

Dependiendo de las condiciones de presión, el plasma también se puede clasificar como **plasma de alta presión, presión atmosférica y baja presión**. En el plasma a presión atmosférica, el plasma se genera a la presión atmosférica normal, lo que elimina la necesidad de costosas cámaras de reacción para mantener la presión. (Pankaj et al., 2018)

El sistema plasma frío de alto voltaje, HVCP por sus siglas en inglés, se compone principalmente de una fuente de energía, un conjunto de electrodos (uno de alta tensión y otro conectado a tierra) y un gas portador. Su funcionamiento se basa en la generación de plasma mediante la interacción de gases ionizados con moléculas y átomos neutros, lo cual ocurre por ionización por impacto electrónico o por fotoionización, siempre que se aporte suficiente energía. Este proceso da lugar a la formación de electrones e iones. Todos los gases, ya sean utilizados de forma individual o combinada, tienen la capacidad de generar plasma, aunque la energía requerida varía según su potencial de ionización. (Olatunde et al., 2023) De acuerdo con esto, se establece otra categoría de clasificación de acuerdo con el gas empleado. Los gases portadores más comunes incluyen **gases reactivos** como el aire atmosférico, oxígeno, nitrógeno y **gases nobles** como el argón (Ar) y el helio (He). En el ámbito del procesamiento de alimentos, el aire atmosférico suele emplearse por su bajo costo; sin embargo, su uso puede provocar una oxidación intensa de lípidos y proteínas, lo que



podría afectar negativamente las características sensoriales y fisicoquímicas del producto final. Por esta razón, en aplicaciones alimentarias donde se busca minimizar la degradación oxidativa, se ha adoptado el uso de gases nobles como portadores en sistemas HVCP. (Mao et al., 2021; Misra et al., 2015). Las distintas clasificaciones se resumen en el mapa conceptual de la Fig. 2.

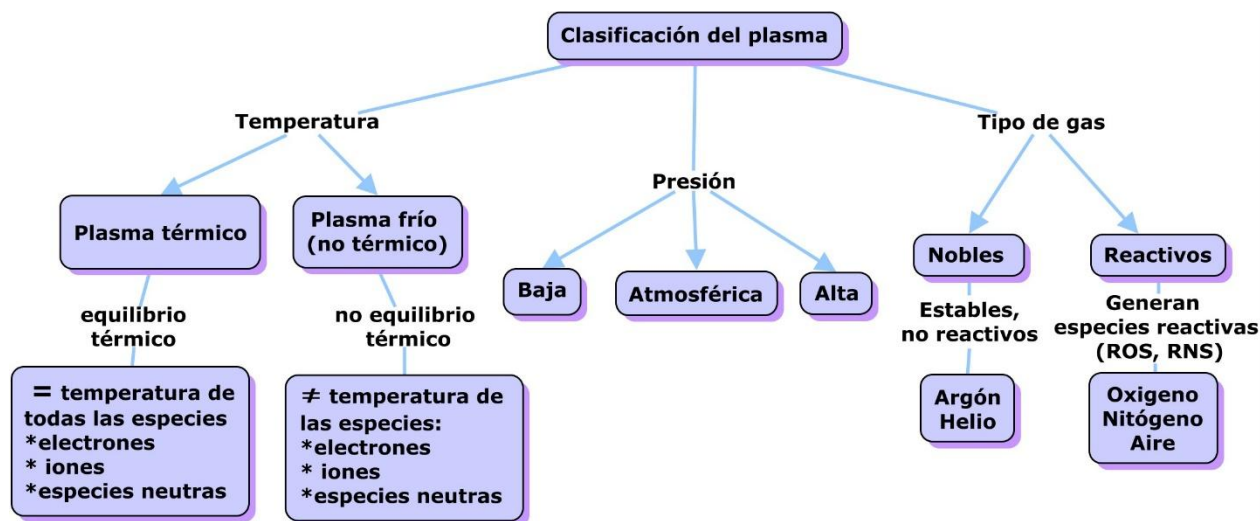


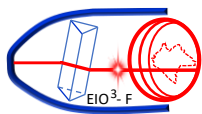
Figura 2. Clasificación del plasma.
ROS: Especies reactivas del oxígeno, RNS: especies reactivas del nitrógeno.

2.3. Aplicaciones generales del plasma frío.

El plasma frío se presenta como una tecnología emergente de gran versatilidad, capaz de transformar múltiples sectores industriales y ambientales. En el ámbito **electrónico y óptico**, se utiliza para limpiar componentes ópticos y semiconductores con alta precisión, evitando daños térmicos y el uso de químicos agresivos. En la **industria automotriz**, mejora la adhesión de recubrimientos y elimina contaminantes en piezas metálicas, reduciendo riesgos de corrosión y sustituyendo procesos químicos tradicionales. El sector **aeroespacial** aprovecha esta tecnología para descontaminar componentes críticos y preparar superficies para recubrimientos funcionales que resisten condiciones extremas. Además, en **medio ambiente**, contribuye a la degradación de pesticidas y microorganismos en aguas residuales y a la reducción de contaminantes gaseosos como NOx (óxidos de nitrógeno) y COV (compuestos orgánicos volátiles), ofreciendo soluciones sostenibles. Su aplicación también se extiende a la **conservación del patrimonio**, donde permite restaurar artefactos y obras delicadas sin comprometer su integridad, y a los **materiales de embalaje**, mejorando la adherencia de tintas y asegurando la esterilización de envases sin calor ni químicos. Estas características posicionan al plasma frío como una herramienta innovadora para procesos más seguros, eficientes y respetuosos con el medio ambiente. (Nwabor et al., 2022; Sun et al., 2025)

2.4. Fuentes del plasma Frío en alimentos.

Los campos eléctricos o electromagnéticos se utilizan ampliamente para la generación de plasma frío (PF). La versatilidad de las fuentes de generación de PF permite diseños únicos que son compatibles con los equipos actuales de la industria alimentaria. Los métodos de generación de plasma más utilizados en el procesamiento de alimentos se clasifican en **descarga de barrera dieléctrica (DBD)**, chorro de plasma, descarga de corona, radiofrecuencia y microondas. En particular, los sistemas más empleados son la descarga con barrera dieléctrica (DBD) y el plasma de chorro (Fig. 3). Los dispositivos DBD constan de dos electrodos metálicos, de los cuales al menos uno está recubierto con una barrera dieléctrica, es decir, un material aislante, que impide el paso directo de corriente eléctrica (como cerámica, cuarzo o vidrio), dicho electrodos se encuentran separados por un espacio variable (desde 0,1 mm hasta varios centímetros). Estas barreras dieléctricas actúan como estabilizadores del sistema, ya que evitan la transición de arco, un fenómeno en el que la descarga eléctrica se vuelve intensa, localizada y extremadamente caliente, lo que puede



dañar los materiales tratados y comprometer la uniformidad del proceso. En lugar de generar un arco eléctrico, los dispositivos DBD producen una gran cantidad de micro descargas distribuidas uniformemente, lo que permite un tratamiento más homogéneo, seguro y controlado. El sistema DBD ofrece diversas aplicaciones gracias a su configuración y flexibilidad en la forma del electrodo y el material dieléctrico utilizado. En la **Fig. 3a** puede observarse el esquema de un sistema de descarga dieléctrica (DBD) donde el electrodo superior está cubierto con una barrera dieléctrica, y el electrodo inferior sirve como electrodo de tierra. Al mismo tiempo, el electrodo de tierra sirve como soporte de muestras, ya que los materiales que se van a tratar quedan atrapados entre los electrodos. Por otro lado, los **dispositivos de chorro de plasma** (**Fig. 3b**) están compuestos por dos electrodos concéntricos, donde el electrodo interno suele estar conectado a una fuente de radiofrecuencia de alta frecuencia que ioniza el gas de trabajo. Este gas ionizado se expulsa por una boquilla, generando una apariencia de “chorro” que puede aplicarse directamente sobre la superficie del alimento. El chorro de plasma produce una descarga estable, homogénea y uniforme a presión atmosférica. Este plasma es limitado cuando se dirige a un área extensa, pero en este caso se debe aplicar la disposición de varios chorros. Aunque numerosos estudios han examinado el plasma de chorro en aplicaciones alimentarias, su uso a escala industrial es poco viable debido a que solo puede tratar superficies muy pequeñas, del orden de mm². Sin embargo, el concepto de plasma de chorro se ha revitalizado para su uso en columnas de burbujeo para tratar alimentos líquidos o producir agua activada por plasma. En este nuevo concepto, el plasma se genera dentro de un tubo y luego se introduce en un recipiente o reactor que contiene un líquido. Aunque no se usa comúnmente en las industrias alimentarias, el **sistema de descarga de microondas** produce plasma de cuasi-equilibrio y no-equilibrio para aplicaciones industriales y médicas. Aquí, el plasma se genera con ondas electromagnéticas que superan los 300 MHz.

La principal ventaja de este sistema es que no requiere un electrodo similar al DBD o al sistema de plasma de chorro. El **sistema de plasma de descarga de corona** tiene más aplicaciones en la industria textil, el medio ambiente y el uso médico. Los electrodos de corona reciben ese nombre porque generan un fenómeno llamado descarga de corona, que ocurre cuando un electrodo con alto voltaje produce una intensa ionización del gas circundante en una región muy localizada, creando un halo luminoso similar a una “corona”. Cuando se aplica un alto voltaje a un electrodo con geometría puntiaguda o con bordes afilados, el campo eléctrico cerca de la superficie es extremadamente intenso. Esto provoca que las moléculas del gas se ionicen, liberando electrones y formando plasma. La ionización no ocurre de manera uniforme en todo el electrodo, sino en zonas específicas donde el campo eléctrico es más fuerte (puntas, bordes). Esto produce un resplandor visible alrededor del electrodo, parecido a una corona luminosa. La ventaja de este sistema es la instalación simple y de bajo costo; sin embargo, su aplicación en alimentos es limitada debido a la falta de uniformidad y la menor área de contacto. Como su nombre indica, un **sistema de descarga por radiofrecuencia** genera plasma mediante radiofrecuencia en lugar de la descarga de corriente empleada por otros métodos. En pocas palabras, este sistema genera plasma sin electrodos, lo que evita la contaminación por vapor metálico. Además, la radiofrecuencia ofrece otras ventajas, como una alta eficiencia de producción y un bajo costo para aplicaciones industriales en comparación con otros sistemas de plasma. Los sistemas de radiofrecuencias no son tan populares en alimentos entre otras cosas porque son difíciles de escalar, esto es, presentan limitaciones para ser aplicados en grandes volúmenes o productos con geometrías complejas, al necesitar condiciones controladas (cámaras cerradas, vacío parcial), son más difícil de integrar en una línea de producción de alimentos. (Fernandes & Rodrigues, 2024; Olatunde et al., 2023; Pankaj et al., 2018)

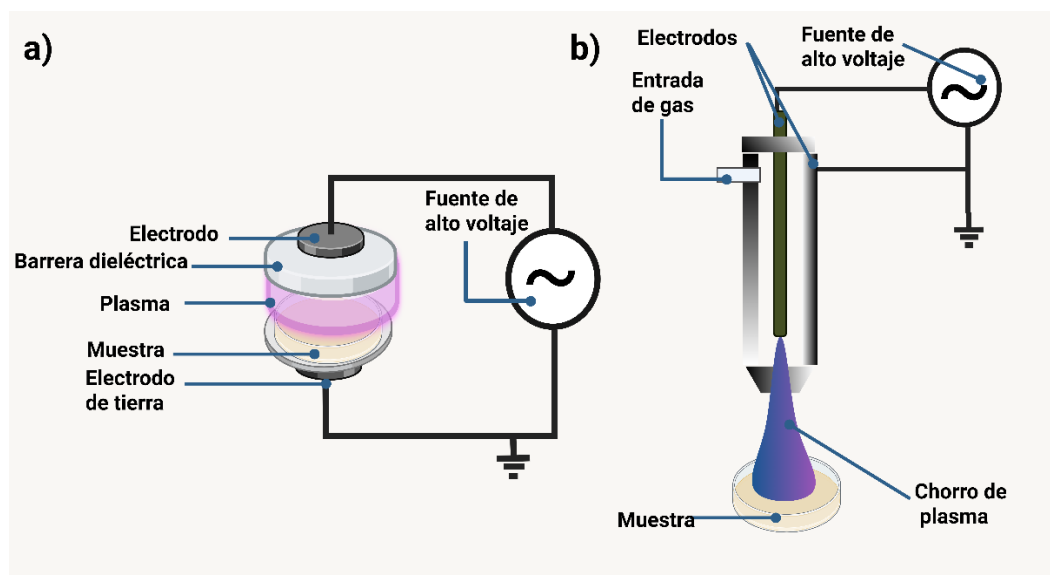
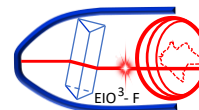


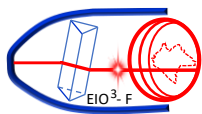
Figura 3. Esquema de (a) descarga de barrera dieléctrica; y (b) chorro de plasma.

2.5. Aplicaciones del plasma frío en alimentos.

El plasma frío se ha convertido en una tecnología emergente con gran potencial en la industria alimentaria, ofreciendo soluciones innovadoras para la **inactivación de microorganismos** y la extensión de la vida útil sin recurrir a tratamientos térmicos que comprometan la calidad. Su aplicación incluye la descontaminación de frutas y vegetales frescos, como lechuga, tomates y bayas, donde logra reducciones significativas de bacterias patógenas y virus sin alterar la textura ni el sabor. En productos líquidos, como jugos y leche, el plasma frío asegura la inocuidad al eliminar microorganismos mientras preserva nutrientes y compuestos bioactivos. También se emplea en productos cárnicos y lácteos, reduciendo la carga microbiana en quesos, carnes y huevos sin generar residuos químicos. Además, esta tecnología contribuye a la **reducción de alérgenos y toxinas en alimentos**, así como a la **inactivación enzimática**, mejorando la estabilidad y calidad del producto. Gracias a su carácter no térmico, el plasma frío responde a la demanda de alimentos seguros, frescos y mínimamente procesados, posicionándose como una herramienta clave para la sostenibilidad y la innovación en el sector alimentario. (Misra et al., 2016; Olatunde et al., 2023)

Como se ha señalado anteriormente, el PF es el resultado de una descarga eléctrica en un gas portador que provoca la ionización del aire atmosférico. Como resultado, el efecto de **inactivación microbiana** del tratamiento con plasma puede atribuirse a la presencia y formación de una serie de productos antimicrobianos en el aire, como la radiación UV, el ozono, las partículas cargadas y el oxígeno sobrecargado (iones del plasma). Todos estos productos actúan conjuntamente para eliminar patógenos como bacterias y virus. Cuando las moléculas de nitrógeno y oxígeno están presentes en la fase gaseosa, los electrones energéticos chocan con ellas a lo largo de su trayectoria y una cascada de reacciones enlazadas da como resultado la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x). En particular, en presencia de oxígeno, se crean radicales hidroxilos ([•]OH) y ozono (O₃), que representan los más agresivos entre otras especies químicas activas. Los radicales hidroxilos ([•]OH) también pueden contribuir a la formación de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) e iones hidronio (H₃O⁺) que normalmente se obtienen en presencia de agua (humedad del gas, humedad superficial del alimento o fase acuosa de la muestra). Además de estas especies, la radiación ultravioleta (UV) y las partículas cargadas también pueden influir en el efecto plasma global.

El efecto inactivador del tratamiento con plasma se debe a una combinación de mecanismos. Estos mecanismos incluyen la radiación UV, que daña el ADN y las proteínas de los microorganismos; el grabado superficial, que descompone físicamente las paredes celulares (grabado hace referencia a la remoción parcial o modificación de la capa superficial, por ejemplo, la pared celular o la membrana externa); y la oxidación producida por especies reactivas, partículas cargadas y ozono, que altera las funciones celulares. Esta combinación sinérgica de procesos elimina



eficazmente los microorganismos y patógenos de las superficies tratadas. El efecto letal del plasma no térmico se produce por la exposición directa o indirecta de los productos alimenticios al gas de alimentación. (Misra et al., 2016) La eficacia antimicrobiana del plasma frío depende de factores como la humedad del alimento, ya que el agua favorece la formación de especies reactivas como H_2O_2 y radicales $OH^\cdot$, lo que incrementa la inactivación microbiana. (Laroque et al., 2022). El principal mecanismo de inactivación microbiana puede variar entre los sistemas de plasma. En sistemas que producen radiación UV, este puede ser el principal mecanismo de inactivación, ya que los fotones UV transmitidos en la descarga de plasma corresponden a la banda de absorción de los ácidos nucleicos.

Cuando se produce una descarga de plasma en aire húmedo, se forman radicales $NO^\cdot$ y $OH^\cdot$. Las altas concentraciones de $NO^\cdot$ reducen el pH del ambiente debido a la formación de HNO_2 y HNO_3 . Si la acidificación es rápida (el pH disminuye de 7,0 a 4,0 en hasta 20 minutos), las bacterias y otros microbios no tienen tiempo de adaptarse y mueren.

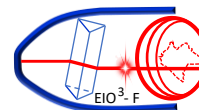
Los radicales $OH^\cdot$ y $O^\cdot$ pueden dañar las células celulares. Altas concentraciones de radicales $OH^\cdot$ actúan como un potente oxidante, induciendo una rápida degradación de la materia orgánica y pueden oxidar los ácidos grasos insaturados en la bicapa lipídica de las paredes celulares, oxidar los cambios laterales de aminoácidos y romper enlaces peptídicos. Los radicales $O^\cdot$ pueden oxidar proteínas e intervenir en el proceso de grabado. Los radicales $OH^\cdot$ se combinan con H_2O_2 en un medio acuoso, que también es un agente oxidante con alta actividad esterilizante. Estas especies reactivas inducen alteraciones en las actividades enzimáticas, peroxidación de lípidos, degradación de proteínas y alteraciones del ADN. Las especies reactivas de nitrógeno causan estrés oxidativo, dañando diversas estructuras celulares, incluyendo lípidos, membranas, proteínas y ADN. (Fernandes & Rodrigues, 2024)

Las enzimas presentes en frutas, verduras y otros productos catalizan reacciones que deterioran la calidad durante el almacenamiento, provocando cambios en color, sabor, aroma y pérdida de valor nutricional. Estas reacciones incluyen el pardeamiento enzimático y la degradación de compuestos sensibles, afectando la estabilidad y aceptación del alimento. Por ello, la inactivación enzimática es esencial para prolongar la vida útil, mantener características sensoriales y garantizar la seguridad del producto. (Fernandes & Rodrigues, 2024)

La **inactivación enzimática** mediante plasma frío se basa en procesos físico-químicos que alteran la estructura proteica. El mecanismo principal involucra el ataque de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (ROS y RNS), como radicales hidroxilo, ozono y peróxidos, que inducen la ruptura de enlaces peptídicos y modifican cadenas laterales de aminoácidos. Estas reacciones provocan cambios en la estructura secundaria, reduciendo el contenido de hélice α y aumentando las láminas β , lo que compromete la funcionalidad enzimática. Además, la radiación UV emitida por el plasma contribuye a la foto degradación de aminoácidos aromáticos (tirosina, triptófano), acelerando la desnaturalización. La sinergia entre oxidación química y fotólisis genera agregación, fragmentación y pérdida de actividad catalítica. La eficacia depende de parámetros como voltaje, tiempo de exposición, composición del gas y densidad de especies reactivas, que determinan la intensidad del estrés oxidativo y la profundidad de las modificaciones estructurales. (Laroque et al., 2022)

El PF puede intervenir en la **reducción de toxinas (micotoxinas y pesticidas)**, su mecanismo de acción se basa en la ruptura de enlaces insaturados y funcionales mediante ataques de radicales como $\bullet OH$, O_3 y $NO^\cdot$, así como en la ionización y escisión fotoquímica de enlaces $C=C$ y $C-O$. En plaguicidas, estas interacciones promueven reacciones de oxidación y fragmentación molecular, reduciendo dichos compuestos. De forma similar, las micotoxinas (aflatoxinas, fumonisinas, zearalenona) son degradadas por especies reactivas y radiación UV, generando productos menos tóxicos que la molécula original. Este enfoque ofrece una alternativa sostenible para la descontaminación de alimentos, alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, sin comprometer la calidad sensorial del producto. (Fernandes & Rodrigues, 2024; Laroque et al., 2022; Misra et al., 2019)

La **alergenicidad de las proteínas** puede **reducirse** mediante modificaciones estructurales y químicas a casusa del PF. Las especies reactivas generadas durante el tratamiento inducen la oxidación de aminoácidos sensibles como cisteína, tirosina y triptófano, así como la ruptura de enlaces disulfuro y peptídicos. Estos cambios alteran la conformación secundaria, disminuyendo el contenido de α -hélice y aumentando las hojas β , lo que provoca la fragmentación de epítopes responsables de la interacción con anticuerpos IgE/IgG. Como resultado, se ha observado una reducción significativa de la capacidad alergénica en proteínas vegetales (soja, maní) y animales (caseína, tropomiosina). (Laroque et al., 2022)



El PF puede **mejorar la digestibilidad de proteínas** al inducir modificaciones estructurales mediante especies reactivas que desnaturalizan y despliegan la estructura proteica, exponiendo sitios de corte antes inaccesibles para las enzimas digestivas. Además, este tratamiento reduce factores anti nutricionales como inhibidores de proteasas (por ejemplo, inhibidor de tripsina en soja) y fragmenta proteínas resistentes, lo que facilita su hidrólisis. También oxida compuestos fenólicos como taninos, evitando la formación de complejos proteína-polifenol que limitan la acción enzimática. En conjunto, estos efectos incrementan la accesibilidad de las proteínas a las peptidasas, favoreciendo su aprovechamiento nutricional y potencial funcional en alimentos.(Olatunde et al., 2023).

Diversos estudios han revisado el uso del plasma frío para la descontaminación microbiológica de alimentos. Más allá de su aplicación en la eliminación de microorganismos, el plasma frío generado a presión atmosférica ha demostrado un notable potencial en múltiples aplicaciones innovadoras. Entre ellas se destacan la mejora de la hidrofobicidad superficial en productos horneados como galletas, la modificación de las propiedades reológicas y de mezclado de masas, la optimización funcional de proteínas de suero, el mejoramiento del rendimiento tecnológico de harinas de arroz, así como el incremento en la germinación de granos y semillas. (Misra et al., 2016)

Conclusiones.

El plasma frío se perfila como una tecnología sostenible y eficiente para la industria alimentaria. Su uso de energía eléctrica en lugar de combustibles fósiles contribuye a reducir las emisiones de CO₂, mientras que la ausencia de efluentes y ciclos de limpieza repetitivos, característicos de procesos químicos, refuerza su carácter ecológico. Además, la acción de especies altamente reactivas evita la generación de residuos químicos, posicionando al plasma frío como una alternativa respetuosa con el medio ambiente.

Este trabajo resalta la versatilidad del plasma frío, con aplicaciones que abarcan desde la inocuidad microbiológica hasta la modificación de propiedades fisicoquímicas en matrices alimentarias. Aunque se trata de una tecnología en desarrollo, los avances en la comprensión de sus mecanismos y en la optimización de parámetros operativos impulsarán su integración en la industria, ofreciendo alimentos más seguros y de mayor calidad frente a los procesos térmicos convencionales.

De cara al futuro, será esencial profundizar en los efectos del plasma sobre compuestos específicos y macronutrientes críticos, así como abordar retos relacionados con el escalado industrial, la regulación normativa y la exploración de nuevas aplicaciones. Estos esfuerzos consolidarán al plasma frío como una herramienta clave para la innovación y la sostenibilidad en el procesamiento de alimentos.

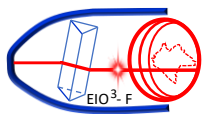
Créditos.

El autor agradece al Programa de Investigación de Canadá por el financiamiento del proyecto.

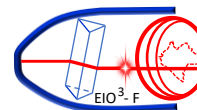
Figuras Creadas en BioRender y Cmap, <https://cmap.ihmc.us/>

Referencias bibliográficas.

- Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R., & van der Mullen, J. (2002).** Gas discharge plasmas and their applications. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 57(4), 609–658. [https://doi.org/10.1016/S0584-8547\(01\)00406-2](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(01)00406-2)
- Chang, R., & College, W. (2002).** Química (F. H. Carrasco (ed.); Septima). McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- Cherif, M. M., Assadi, I., Khezami, L., Ben Hamadi, N., Assadi, A. A., & Elfalleh, W. (2023).** Review on Recent



- Applications of Cold Plasma for Safe and Sustainable Food Production: Principles, Implementation, and Application Limits. *Applied Sciences*, 13(4), 2381. <https://doi.org/10.3390/app13042381>
- Fernandes, F. A. N., & Rodrigues, S. (2024).** Cold plasma technology for sustainable food production: meeting the United Nations sustainable development goals. *Sustainable Food Technology*, 3(1), 32–53. <https://doi.org/10.1039/d4fb00209a>
- Fridman, G., Friedman, G., Gutsol, A., Shekhter, A. B., Vasilets, V. N., & Fridman, A. (2008).** Applied Plasma Medicine. *Plasma Processes and Polymers*, 5(6), 503–533. <https://doi.org/10.1002/ppap.200700154>
- Knorr, D., & Augustin, M. A. (2021).** Food processing needs, advantages and misconceptions. *Trends in Food Science & Technology*, 108(December 2020), 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.11.026>
- Laroque, D. A., Seo, S. T., Valencia, G. A., Laurindo, J. B., & Carciofi, B. A. M. (2022).** Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application. *Journal of Food Engineering*, 312(April 2021), 110748. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110748>
- Mao, L., Mhaske, P., Zing, X., Kasapis, S., Majzoobi, M., & Farahnaky, A. (2021).** Cold plasma: Microbial inactivation and effects on quality attributes of fresh and minimally processed fruits and Ready-To-Eat vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 116(July), 146–175. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.002>
- Misra, N. N., Pankaj, S. K., Frias, J. M., Keener, K. M., & Cullen, P. J. (2015).** The effects of nonthermal plasma on chemical quality of strawberries. *Postharvest Biology and Technology*, 110, 197–202. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.08.023>
- Misra, N. N., Pankaj, S. K., Segat, A., & Ishikawa, K. (2016).** Cold plasma interactions with enzymes in foods and model systems. *Trends in Food Science and Technology*, 55, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.07.001>
- Misra, N. N., Tiwari, B. K., & Cullen, P. J. (2019).** Cold plasma for mycotoxin degradation: Mechanisms and applications. *Food and Bioprocess Technology*, 12(4), 543–558. <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02260-4>
- Nwabor, O. F., Onyeaka, H., Miri, T., Obileke, K., Anumudu, C., & Hart, A. (2022).** A Cold Plasma Technology for Ensuring the Microbiological Safety and Quality of Foods. *Food Engineering Reviews*, 14(4), 535–554. <https://doi.org/10.1007/s12393-022-09316-0>
- Olatunde, O. O., Hewage, A., Dissanayake, T., Aluko, R. E., Karaca, A. C., Shang, N., & Bandara, N. (2023).** Cold atmospheric plasma-induced protein modification: Novel nonthermal processing technology to improve protein quality, functionality, and allergenicity reduction. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(3), 2197–2234. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13144>
- Pankaj, S. K., Wan, Z., & Keener, K. M. (2018).** Effects of cold plasma on food quality: A review. *Foods*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/foods7010004>
- Segat, A., Misra, N. N., Cullen, P. J., & Innocente, N. (2016).** Effect of atmospheric pressure cold plasma (ACP) on activity and structure of alkaline phosphatase. *Food and Bioprocess Processing*, 98, 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.01.010>
- Sun, J., Yu, Y., Tang, J., Zeng, Y., & Chen, J. (2025).** Plasma Cleaning Technology: Mechanisms, Influencing Factors, and Applications. *IEEE Access*, 13(January), 37221–37242. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3532662>



Biografía del investigador.



Dra. Mariela Rodríguez, Investigadora Posdoctoral en Ciencias de la Nutrición Humana en la Universidad de Manitoba. Es especialista en proteínas vegetales, péptidos bioactivos y compuestos fenólicos, con enfoque en tecnologías verdes para el desarrollo de ingredientes funcionales sostenibles. Su tesis doctoral (Ciencias Biológicas, UNLP, Argentina), titulada “Evaluación de la harina de amaranto como ingrediente antioxidante para la preparación de matrices alimentarias funcionales”, combinó metodologías *in vitro* e *in vivo* para evaluar el potencial antioxidante de ingredientes a base de amaranto y subproductos, como el orujo de uva. Ha sido reconocida con premios internacionales por la calidad e impacto de su investigación, y es autora principal en múltiples publicaciones científicas en revistas de alto impacto como *Food Research International*, *Food & Function* y *Plant Foods for Human Nutrition*. Actualmente, colabora con equipos de investigación en Canadá, Italia y Argentina, promoviendo la innovación en el sector agroalimentario.