

Use of cold plasma to improve seed germination

Uso del plasma frío para mejorar la germinación de semillas

Iracheta-Rivera, P.¹, Reyes-Acosta, A.V.², Rubio-Ríos A.¹, Narro-Cespedes, R.I.¹, Reyes-Acosta, Y.K.^{1*}

¹Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Ingeniería y Simulación de Procesos Químicos, Saltillo, Coahuila, México

²Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Sistemas, Saltillo, Coahuila, México

*Autor para correspondencia: ykreyes@uadec.edu.mx

Recibido: 08 de marzo de 2023

Aceptado: 02 de mayo de 2023

Resumen

La demanda de productos alimenticios aumenta día con día debido al crecimiento continuo de la población. La urbanización, industrialización y el cambio climático están provocando una escasez de alimentos. Este conjunto de factores ha provocado reducciones significativas en el rendimiento y calidad, tanto de cultivos como de productos agrícolas; esto amenaza la seguridad alimentaria mundial y obliga al ser humano a encontrar una manera de incrementar la producción de alimentos. Una forma de afrontar este problema es mejorando la producción de los cultivos. Recientemente, se han estudiado los efectos del plasma no térmico en la germinación de diferentes semillas y se han reportado resultados diversos. El plasma de barrera dieléctrica (DBD) en semillas de rábano mostró que los cambios físicos y químicos dependían del color de las semillas y del año de cosecha. En semillas de espinaca la germinación incrementó un 75 % se logró mejorar la salud de semillas de soja infectadas por hongos, y en semillas de comino se observaron incrementos de clorofila. Las investigaciones actuales reportan la influencia positiva del uso del plasma en la esterilización y descontaminación de semillas, en la inducción del rompimiento de la etapa de latencia, en la estimulación del crecimiento de plántulas y en la alteración de la actividad enzimática. Las principales ventajas que ofrece cualquier tipo de plasma son: proporcionar esterilidad en la superficie de las semillas y aumentar su permeabilidad. El uso de la tecnología de plasma no térmico en la agricultura ha demostrado ser ecológicamente benigno, no incorpora compuestos tóxicos al medio ambiente y se han obtenido resultados favorables en la germinación de diversas semillas. El plasma puede ser un potenciador de efectos positivos en la germinación, pero aún existen diversas aplicaciones y/o condiciones que pueden y deben ser estudiadas, recalando que los efectos del plasma varían según la fuente, las circunstancias del tratamiento y el tipo de semilla.

Palabras clave: germinación, plasma, semillas, sobrepoblación, agricultura.

Abstract

The demand for food products is on the rise due to the continuous growth of the population, leading to food shortages caused by urbanization, industrialization, and climate change. These factors have significantly reduced crop yields and quality, posing a threat to global food security and forcing humans to seek ways to increase food production. Improving crop production is one approach to addressing this problem. Recent studies have investigated the effects of non-thermal plasma on seed germination, with mixed results reported. Dielectric barrier plasma (DBD) in radish seeds revealed physical and chemical changes that were dependent on seed color and harvest year. In spinach seeds, germination increased by 75 %, and the health of soybean seeds infected by fungi improved. Cumin seeds showed an increase in chlorophyll levels. Current investigations suggest that plasma can sterilize and decontaminate sources, induce the breaking of dormant stages, stimulate seedling growth, and alter enzymatic activity. The use of non-thermal plasma technology in agriculture has been found to be ecologically benign, as it does not introduce toxic compounds into the environment. Positive results have been obtained in the germination of various seeds using plasma, making it a potential enhancer of positive effects on germination. However, the effects of plasma can vary depending on the source, treatment conditions, and seed type, emphasizing the need for further research.

Keywords: germination, overpopulation, plasma, seeds, agriculture.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la agricultura enfrenta severos problemas causados principalmente por el continuo crecimiento de la población mundial, la contaminación ambiental, la escasez de tierras agrícolas, la reducción de los recursos hídricos y el cambio climático (Khatami and Ahmadinia, 2018). Este conjunto de factores ha provocado reducciones significativas en el rendimiento y calidad de los cultivos y productos agrícolas; esto amenaza la seguridad alimentaria mundial y obliga al ser humano a encontrar una manera de incrementar la producción de alimentos.

El cambio climático, la contaminación ambiental y la resistencia de los patógenos a los agentes químicos, son los principales elementos que debe confrontar la industria alimentaria para garantizar una alimentación sana, tanto para personas como para el ganado (Pet'ková et al., 2021). Es por todas estas causas que la mejora de los rendimientos agrícolas está adquiriendo una importancia primordial en el mundo actual. Sin embargo, el aumento de la demanda de productos alimenticios solo debe afrontarse mejorando el rendimiento de la producción de cultivos por métodos sostenibles, sobre todo desde un punto de vista medioambiental y económico (Billah et al., 2020). Una de las posibles soluciones más estudiada en la actualidad está enfocada en aumentar la calidad de las semillas y su resistencia a diversos elementos ambientales (Khatami and Ahmadinia, 2018). El objetivo de la revisión es conocer el efecto de la modificación superficial de diferentes semillas mediante la tecnología del plasma, y conocer cómo afecta la tasa de germinación. El plasma no térmico es una tecnología emergente que ha demostrado ser ecológicamente benigno, no incorpora compuestos tóxicos al medio ambiente y se han obtenido resultados positivos en la germinación de diversas semillas (Holc et al., 2019)

ANTECEDENTES

El crecimiento poblacional, industrial, la deforestación, la escasez de tierras agrícolas, la contaminación y el cambio climático, afecta directamente a la agricultura. (Khatami and Ahmadinia, 2018). Dentro de la agricultura una parte importante es el proceso de germinación, este es un proceso vegetativo que comienza con la toma de agua por la semilla (imbibición) y finaliza con el inicio de elongación de un eje embrionario, el cual recibe el nombre de radícula (Palacios, 2000). La formación de la semilla se da mediante una embriogénesis cigótica que comprende cambios morfológicos, estructurales y de expresión génica. De la embriogénesis dependerá el éxito de la germinación y, por ende, el desarrollo del nuevo individuo (Matilla, 2003).

La germinación y la emergencia de las plántulas son las dos etapas más importantes en el ciclo de vida de las plantas. Factores ambientales como la temperatura, luz, el pH y el agua afectan la germinación de cualquier semilla (Ji et al., 2016).

Diferentes fisiólogos vegetales concuerdan en que una semilla ha germinado cuando la radícula protruye a través de su cubierta exterior. Por lo tanto, la germinación incluye numerosos eventos, como puede ser la hidratación de proteínas, cambios de estructuras subcelulares, respiración, síntesis de macromoléculas (Palacios, 2000). Se conoce como emergencia radicular al procedimiento por el cual la radícula o el eje embrionario atraviesan los tejidos envolventes y pasan de un metabolismo generalmente anaerobio a otro aerobio. La emergencia marca el fin de la germinación y el comienzo del crecimiento de la plántula (Matilla, 2003).

Investigaciones recientes informan la influencia positiva del uso de plasma en la esterilización y descontaminación de semillas, rompiendo la etapa de latencia, estimulando el crecimiento de plántulas y alterando la actividad enzimática (Hosseini et al., 2018). El tratamiento con plasma proporciona modificaciones físicas y bioquímicas únicas que aumentan el porcentaje de germinación (Attri et al., 2021), como se puede observar en la Tabla 1. Esta tecnología se considera ecológicamente amigable por su baja o nula generación de residuos y un mínimo consumo energético (Tsai et al., 2010). Sin embargo, la eficiencia del tratamiento es variable y puede cambiar según la fuente de plasma, el gas utilizado y el tipo de semilla. Por estas razones, es casi imposible determinar las condiciones generales del tratamiento con plasma. El tiempo de proceso es uno de los factores más importantes y se ha demostrado que una exposición prolongada puede causar un daño grave en la morfología de las semillas (Pet'ková et al., 2021).

Las investigaciones han arrojado diferentes resultados, por ejemplo, en un tratamiento con plasma de descarga de barrera dieléctrica (DBD) se logró mejorar el sistema de defensa y se previno el daño ambiental, lo que desarrolló una respuesta adaptativa en plantas de frijol negro (Billah et al., 2020). En otro procedimiento con plasma LPDBD (Ar + Aire) se concluyó que este podría ser capaz de incrementar actividades fisiológicas en plantas de arroz (Billah et al., 2021). En la creación de un plasma fluorinated silicate glass (FSG), se mencionó el potencial en el aumento de la resistencia de las plantas contra la sequía y la oscuridad (Khatami and Ahmadinia, 2018). No obstante, aún son desconocidos los principales mecanismos que ocurren durante y después del tratamiento de semillas con plasma (Starič et al., 2020).

Tabla 1. Efectos del tratamiento de plasma en la germinación de diferentes semillas.

Plasma	Parámetros plasma	Semilla	Resumen de resultados
DBD (descarga de barrera dieléctrica)	t: 3 min f: 14.4 kHz	Rábano (<i>Raphanus sativus</i> L.)	Aceleración del proceso de germinación mediante la modificación de componentes físicos y bioquímicos de las semillas, relacionados con el color y tiempo de almacenamiento de la semilla (Attri et al., 2021)
	Aire f: 4.5 kHz p: 400 torr t: (20, 40, 60, 90, 120 y 180) s V: 5 kV	Frijol negro (<i>Vigna mungo</i> L.)	Aumento de permeabilidad, longitud de brotes y del contenido de N ₂ (Billah et al., 2020)
	Aire f: 22 kHz t: (0.5, 1, 3 y 5) min V: 6 kV *plasma pulsado de alto voltaje: 1, 5 o 10 disparos de pulso de nanosegundos	Espinaca (<i>Spinacia oleracea</i> L.)	Incremento en el contenido de clorofila, tanto el plasma de descarga pulsada de alto voltaje como el DBD pueden mejorar la germinación (Ji et al., 2016)
	Ar, (Ar / O ₂ : 80 % / 20%) t: 10 min	Ginseng (<i>Panax ginseng</i>)	Mejora en la germinación y eficiencia en actividad antifúngica contra <i>C. destructans</i> (Lee et al., 2021)
	Aire P: 65 W t: 60 a 180 s	Frijol de soya (<i>Glycine max</i> (L.) Merrill)	Mejoró la salud de las semillas al reducir el Hong D / P, mejoramiento de absorción de agua (Pérez Pizá et al., 2018)
	Aire f: 50 Hz P: 118 W t: (2, 3 y 4) min V: 2 kV	Comino (<i>Cuminum cyminum</i> L.)	Incremento de la germinación (43.24 %) y estimulación de humectabilidad y capacidad de absorción de agua (Paatre Shashikanthalu et al., 2020)
	f: 990 Hz t: (3, 9 y 15) min V: 17.5 kV	Mimosa <i>caesalpiniaefolia</i>	Se mejoró la tasa de germinación (50 %) y la superficie de la semilla se volvió más hidrófila (da Silva et al., 2017)
	Argón P: (100, 135, 170 y 200) W p: 1 atm t: (25, 50, 75, 100, 150, 200 y 300) s	Arroz (<i>Oryza sativa</i> L.)	Se aumento la longitud de raíz (57 %), la altura de la plántula (69 %) y el porcentaje de germinación (84 %) (Yodpitak et al., 2019)
	Helio f: 750 Hz P: 150 W t: 60 s V: 10 kV	<i>Erythrina velutina</i>	Incremento de la germinación (5 % más que el control), disminución del ángulo de contacto aparente semilla-agua (48 %) (Junior et al., 2016)
	Aire f: 1 kHz	Quinoa (<i>Chenopodium</i>	Un exceso de plasma RF puede ser perjudicial para la germinación, se

	p: 500 mbar P: 6.4 W t: (10, 30, 60, 180 y 900) s V: 8.2 kV *RF f: 13.56 MHz p: 0.1 mbar P: 15 W t: (10,30,60 y 180) s	quinoa)	necesita más tiempo de plasma DBD para mejorar la germinación a comparación del plasma RF (Gómez-Ramírez et al., 2017)
SDBD (descarga de barrera dieléctrica de superficie)	Aire f: 30 kHz P: 400 W t: (0, 10, 20, 40 y 80) s.	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	Mejora el crecimiento de la cebada después de la germinación (min. 15 % y máx. 110%), erosión de la capa superior en la semilla (Park et al., 2018)
CAPP (plasma frio a presión atmosférica)	Aire / N ₂ y O ₂ f: 15 kHz P: 400 W t: (10, 20, 30, 60, 180 y 300) s V: 20 kV	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	Dosis bajas (20 s aire-N ₂ y 30 s O ₂) tienen efecto positivo en la dinámica de germinación. Hubo daño al ADN (38 %) con Aire a 60 s (Pet'ková et al., 2021)
	He / Ar f: 6 kHz t: 70 ns V: 8 kV	Pumpkin Cucurbita pepo L., Cinderella, Cucurbita maxima L., Jarrahdale y Cucurbita maxima L.	Mejora la absorción de agua por la formación de poros en la semilla (Volkov et al., 2019)
LPDBD (descarga de barrera dieléctrica de baja presión)	(Ar + aire) f: 4.5 kHz t: (2, 4, 6, 8 y 10) min V: 3 kV	Arroz (<i>Oryza Sativa</i> L.)	Cambios en la capa externa de la semilla y aumento en la tasa de germinación (9.72 %) (Billah et al., 2021)
LFGD (Descarga luminiscente de baja frecuencia)	(Ar + O ₂) f: 5 kHz p: 400 torr P: 45 W t: (30, 60, 90 y 120) s V: 5 kV	Maíz (<i>Zea mays</i> L.)	Se potencio la tasa de germinación (15.88 %), longitud de brotes (33.42 %) y raíz (10.67 %), diámetro del tallo (13.37 %) y el contenido de clorofila (46.93 %) (Karmakar et al., 2021)
RF (radio frecuencia)	Aire, (O ₂ + N ₂) p: 800 mtorr P: 50 W t: (1, 15 y 30) min	Espárragos (<i>Asparagus acutifolius</i> L.)	La germinación mejoro en un 15 %, se observó actividad antifúngica (Lo Porto et al., 2019)
	O ₂ (80 %), Ar (20 %) f: 13.56 MHz p: 0.4 mbar P: (30, 90, 150, 210 y 270) W	Albahaca dulce (<i>Ocimum basilicum</i> L.)	Aumento en la germinación y el contenido de carbohidratos y proteínas, con valores máximos de 66.6, 24.1 y 23.4 % respectivamente (Singh et al., 2019)
	O ₂ f: 27.12 MHz p: 15 a 60 Pa P: 400 W	Ajo (<i>Allium sativum</i>)	Estimulación de crecimiento de raíces, aumento en la absorción de agua aprox. 35 % para 60 Pa (Holc et al., 2019)

	t: 60 s		
	N ₂ p: 1.8 Pa P: 10 W t: (3, 10 y 15) min	Alcachofa (<i>Cynara scolymus</i> L.)	Se mejoró la tasa de germinación (11.7 %), la longitud de raíces (50 %), y absorción de agua (36.9 %) (Hosseini et al., 2018)
MAP (arco magnetizado)	p: 10-20 Pa P: 400 W t: 0.45 s intensidad campo magnético longitudinal (0 a 500 G), concentraciones (0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 y 3) A	Espinaca (<i>Spinacia olerace</i> L.)	Aumento en la tasa (137.2 %) y el vigor (217.6 %) de germinación (Shao et al., 2013)
FSG (diseñado y creado)	Aire t: 30 y 60 s V: 15 kV	Guisantes y calabacín	Aumento de la germinación (máx. 80.4 %) y activada antimicrobiana (Khatami and Ahmadinia, 2018)
DCSBD (descarga de barrera de superficie coplanar difusa)	Aire f: 14 Hz P: 370 W t: 60 – 600 s V: 10 kV	Guisante (<i>Pisum sativum</i>)	Aumento en la absorción de agua (23.3 %), longitud de brotes (4.7 a 13.5) cm y raíces (4.1 a 12) cm (Stolárik et al., 2015)
PAW (agua activada por plasma)	Plasma de aire	Frijol mungo (<i>Vigna radiata</i>)	Se redujo la población de <i>E. coli</i> NCTC 12900 sin impactos negativos en la germinación (Darmanin et al., 2020)
	Plasma de aire	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>), frijol mungo (<i>Vigna radiata</i>)	No hubo impacto significativo en la germinación, se demostró actividad antimicrobiana (Machado-Moreira et al., 2021)
Parámetros: frecuencia (f), potencia (P), presión (p), tiempo de irradiación (t), voltaje (V).			

En base a los datos mostrados en la tabla 1, se observó repetidamente el incremento de la germinación mediante la tecnología emergente del plasma sin importar el tipo, eso propicia el siguiente mecanismo de acción, controlando el tipo de gas, la potencia y el tiempo de exposición, se logra erosionar nanométricamente la superficie de las semillas, esta acción presenta diminutas estrías, provocando que el agua pueda adentrarse a la semilla de manera más eficiente incrementando la tasa de germinación.

El plasma es un efecto que se da en la naturaleza, pero como tecnología emergente en el área de la agricultura y alimentos aún queda un campo bastante amplio de estudio, generando un mundo de nuevas posibilidades. Hasta el momento se conoce que los principales efectos de desarrollo de semillas en el espacio son: el retraso en la maduración, la alteración de la composición de metabolitos y la tasa de acumulación de reservas (proteínas, almidón, lípidos). Se ha descubierto que los metabolitos secundarios están controlados en el espacio por los mismos factores que en la Tierra. El primer parámetro y posiblemente el más importante para el crecimiento

de las plantas, es la disponibilidad y distribución del agua, de igual forma se tiene que tomar en cuenta que los períodos de oscuridad prolongados disminuyen su productividad. Sin embargo, aún no existe información sobre cuánto tiempo pueden tolerar la oscuridad o los períodos de luz prolongados sin efectos negativos (Kordyum and Hasenstein, 2021). Estas cuestiones han tenido respuestas positivas en artículos recientes gracias a tratamientos con plasma, por lo que tal vez el siguiente paso para esta tecnología sería ser estudiada en condiciones espaciales, sin olvidar que los efectos del plasma varían según la fuente, las circunstancias del tratamiento y el tipo de semilla. A pesar de presentar tan buenos resultados, es necesario demostrar que las semillas, aunque incrementan la germinación entre 15-90 % su tasa, no presentan alteraciones en el fruto a nivel genético. Es necesario continuar con los estudios pertinentes para que esta tecnología sea utilizada en el mercado.

CONCLUSIONES

En esta revisión se registran distintos tratamientos superficiales, con diferentes reactores de plasma por ejemplo descarga de barrera, dieléctrico, atmosférico, baja frecuencia, radio frecuencia, de arco, y en todos los distintos equipos, con diversas semillas tales como rábano, frijol, espinaca, ginseng, comino, arroz, entre otras, sin ser afectado por el tamaño, la morfología o incluso color, en general todas las semillas incrementaron la tasa de germinación, entre 15 - 85 %, también se reporta actividad antifúngica, incremento la absorción del agua 23 - 40 %, incluso se presenta la germinación en condiciones de vuelos espaciales.

REFERENCIAS

- Adhikari, B., Adhikari, M., Park, G., 2020. The effects of plasma on plant growth, development, and sustainability. *Appl Sci* (Switzerland). <https://doi.org/10.3390/app10176045>
- Attri, P., Ishikawa, K., Okumura, T., Koga, K., Shiratani, M., Mildaziene, V., 2021. Impact of seed color and storage time on the radish seed germination and sprout growth in plasma agriculture. *Sci Rep* 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81175-x>
- Billah, M., Karmakar, S., Mina, F.B., Haque, M.N., Rashid, M.M., Hasan, M.F., Acharjee, U.K., Talukder, M.R., 2021. Investigation of mechanisms involved in seed germination enhancement, enzymatic activity and seedling growth of rice (*Oryza Sativa* L.) using LPDBD (Ar+Air) plasma. *Arch Biochem Biophys* 698. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2020.108726>
- Billah, M., Sajib, S.A., Roy, N.C., Rashid, M.M., Reza, M.A., Hasan, M.M., Talukder, M.R., 2020. Effects of DBD air plasma treatment on the enhancement of black gram (*Vigna mungo* l.) seed germination and growth. *Arch Biochem Biophys* 681. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2020.108253>
- da Silva, A.R.M., Farias, M.L., da Silva, D.L.S., Vitoriano, J.O., de Sousa, R.C., Alves-Junior, C., 2017. Using atmospheric plasma to increase wettability, imbibition and germination of physically dormant seeds of *Mimosa caesalpiniaefolia*. *Colloids Surf B Biointerfaces* 157. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.05.063>
- Darmanin, M., Kozak, D., de Oliveira Mallia, J., Blundell, R., Gatt, R., Valdramidis, V.P., 2020. Generation of plasma functionalized water: Antimicrobial assessment and impact on seed germination. *Food Control* 113. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107168>
- Gómez-Ramírez, A., López-Santos, C., Cantos, M., García, J.L., Molina, R., Cotrino, J., Espinós, J.P., González-Elipse, A.R., 2017. Surface chemistry and germination improvement of Quinoa seeds subjected to plasma activation. *Sci Rep* 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06164-5>
- Holc, M., Prime, G., Iskra, J., Titan, P., Kovač, J., Mozetič, M., Junkar, I., 2019. Effect of oxygen plasma on sprout and root growth, surface morphology and yield of garlic. *Plants* 8. <https://doi.org/10.3390/plants8110462>
- Hosseini, S.I., Mohsenimehr, S., Hadian, J., Ghorbanpour, M., Shokri, B., 2018. Physico-chemical induced modification of seed germination and early development in artichoke (*Cynara scolymus* L.) using low energy plasma technology. *Phys Plasmas* 25. <https://doi.org/10.1063/1.5016037>
- Ji, S.H., Choi, K.H., Pengkit, A., Im, J.S., Kim, J.S., Kim, Y.H., Park, Y., Hong, E.J., Jung, S. kyung, Choi, E.H., Park, G., 2016. Effects of high voltage nanosecond pulsed plasma and micro DBD plasma on seed germination, growth development and physiological activities in spinach. *Arch Biochem Biophys* 605. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2016.02.028>
- Junior, C.A., De Oliveira Vitoriano, J., Da Silva, D.L.S., De Lima Farias, M., De Lima Dantas, N.B., 2016. Water uptake mechanism and germination of *Erythrina velutina* seeds treated with atmospheric plasma. *Sci Rep* 6. <https://doi.org/10.1038/srep33722>
- Karmakar, S., Billah, M., Hasan, M., Sohan, S.R., Hossain, M.F., Faisal Hoque, K.M., Kabir, A.H., Rashid, M.M., Talukder, M.R., Reza, M.A., 2021. Impact of LFGD (Ar+O₂) plasma on seed surface, germination, plant growth, productivity and nutritional composition of maize (*Zea mays* L.). *Heliyon* 7. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06458>
- Khatami, S., Ahmadiania, A., 2018. Increased germination and growth rates of pea and Zucchini seed by FSG plasma. *J Theor Appl Phys* 12. <https://doi.org/10.1007/s40094-018-0280-5>
- Kordyum, E., Hasenstein, K.H., 2021. Plant biology for space exploration – Building on the past, preparing for the future. *Life Sci Space Res* (Amst). <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.01.003>
- Lee, Y., Lee, Y.Y., Kim, Y.S., Balaraju, K., Mok, Y.S., Yoo, S.J., Jeon, Y., 2021. Enhancement of seed germination and microbial disinfection on ginseng by cold plasma treatment. *J Ginseng Res* 45. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2020.12.002>
- Lo Porto, C., Sergio, L., Boari, F., Logrieco, A.F., Cantore, V., 2019. Cold plasma pretreatment improves the germination of wild asparagus (*Asparagus acutifolius* L.) seeds. *Sci Hortic* 256. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108554>
- Machado-Moreira, B., Tiwari, B.K., Richards, K.G., Abram, F., Burgess, C.M., 2021. Application of plasma activated water for decontamination of alfalfa and mung bean seeds. *Food Microbiol* 96. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2020.103708>
- Mandal, R., Singh, A., Pratap Singh, A., 2018. Recent

- developments in cold plasma decontamination technology in the food industry. *Trends Food Sci Technol.* <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.07.014>
- Matilla, Á.J., 2003. Desarrollo y germinación de las semillas. *Fundamentos de Fisiología Vegetal.*
- Paatre Shashikanthalu, S., Ramireddy, L., Radhakrishnan, M., 2020. Stimulation of the germination and seedling growth of *Cuminum cyminum* L. seeds by cold plasma. *J Appl Res Med Aromat Plants* 18. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2020.100259>
- Palacios, R.R., 2000. Efecto de iones y otros factores físicos sobre la germinación de semillas. *J Mex Chem Soc* 44.
- Park, Y., Oh, K.S., Oh, J., Seok, D.C., Kim, S.B., Yoo, S.J., Lee, M.J., 2018. The biological effects of surface dielectric barrier discharge on seed germination and plant growth with barley. *Plasma Processes Polym.* <https://doi.org/10.1002/ppap.201600056>
- Pérez Pizá, M.C., Prevosto, L., Zilli, C., Cejas, E., Kelly, H., Balestrasse, K., 2018. Effects of non-thermal plasmas on seed-borne Diaporthe/Phomopsis complex and germination parameters of soybean seeds. *Innovative Food Sci Emerg Technol.* <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.07.009>
- Pet'ková, M., Švubová, R., Kyzek, S., Medvecká, V., Slováková, L., Ševčovičová, A., Gálová, E., 2021. The effects of cold atmospheric pressure plasma on germination parameters, enzyme activities and induction of DNA damage in barley. *Int J Mol Sci* 22. <https://doi.org/10.3390/ijms22062833>
- Shao, C., Wang, D., Tang, X., Zhao, L., Li, Y., 2013. Stimulating effects of magnetized arc plasma of different intensities on the germination of old spinach seeds. *Math Comput Model* 58. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2012.12.022>
- Singh, R., Prasad, P., Mohan, R., Verma, M.K., Kumar, B., 2019. Radiofrequency cold plasma treatment enhances seed germination and seedling growth in variety CIM-Saumya of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *J Appl Res Med Aromat Plants* 12. <https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2018.11.005>
- Starič, P., Vogel-Mikuš, K., Mozetič, M., Junkar, I., 2020. Effects of nonthermal plasma on morphology, genetics and physiology of seeds: A review. *Plants*. <https://doi.org/10.3390/plants9121736>
- Stolárik, T., Henselová, M., Martinka, M., Novák, O., Zahoranová, A., Černák, M., 2015. Effect of Low-Temperature Plasma on the Structure of Seeds, Growth and Metabolism of Endogenous Phytohormones in Pea (*Pisum sativum* L.). *Plasma Chem Plasma Process* 35. <https://doi.org/10.1007/s11090-015-9627-8>
- Tsai, G., Montero, J., Calle, W., Quinde, M., Sarmiento, P., 2010. Plasma: una tecnología de gran potencial para la industria y la ciencia. *Ingenius*. <https://doi.org/10.17163/ings.n4.2010.07>
- Volkov, A.G., Hairston, J.S., Patel, D., Gott, R.P., Xu, K.G., 2019. Cold plasma poration and corrugation of pumpkin seed coats. *Bioelectrochemistry* 128. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2019.04.012>
- Yodpitak, S., Mahatheeranont, S., Boonyawan, D., Sookwong, P., Roytrakul, S., Norkaew, O., 2019. Cold plasma treatment to improve germination and enhance the bioactive phytochemical content of germinated brown rice. *Food Chem* 289. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.061>