

Explorando los impactos de campos eléctricos y magnéticos en el crecimiento vegetal: una revisión

Exploring the impacts of electrical and magnetic fields on plant growth: a review

Ana Lizbeth Arredondo Hernández, Regina Fernández Cabrera, Yunuen Salazar Vargas, Andrea Guadalupe Carrillo Rodríguez, Luis Ángel Rodríguez Montelongo, Karla Itzel Ramírez Ramírez, Cassandra Michelle Valdés Caudillo, Jesús René Báez Espinoza, María Jesús Puy Y Alquiza, Berenice Noriega Luna.

¹División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato
berenice.noriega@ugto.mx

Resumen

Numerosas investigaciones han explorado los efectos de los campos eléctricos y magnéticos en las plantas, lo que impulsó una búsqueda bibliográfica para examinar el estado actual de la estimulación eléctrica y magnética en semillas y plantas, así como su impacto en la agricultura moderna. Es esencial continuar progresando en esta área de estudio debido a la clara influencia que los estímulos eléctricos y magnéticos tienen en el crecimiento, desarrollo y productividad de las plantas. Comprender la respuesta de las semillas y plantas a estos estímulos puede proporcionar información valiosa para potenciar la agricultura y mejorar la producción de alimentos. Además, la investigación sobre los efectos de los campos eléctricos y magnéticos en las plantas podría conducir al desarrollo de técnicas y tecnologías innovadoras para fortalecer la resistencia de los cultivos ante condiciones ambientales desfavorables, mejorar la calidad de los alimentos y aumentar los rendimientos agrícolas. Estos estudios tienen el potencial de impulsar avances en la ciencia agrícola y fomentar la sostenibilidad en la producción de alimentos.

Palabras clave: estimulación eléctrica; estimulación magnética; semillas; plántulas.

Introducción

Los efectos de los estímulos eléctricos y magnéticos en semillas y plantas han sido objeto de estudio en la investigación científica. Se ha observado que la aplicación de estímulos eléctricos puede influir en la germinación de las semillas, promoviendo un crecimiento más rápido y saludable de las plantas. Por otro lado, los estímulos magnéticos también pueden tener efectos positivos en el desarrollo de las plantas, estimulando procesos fisiológicos y metabólicos que favorecen su crecimiento. Estas técnicas de estimulación pueden ser una herramienta interesante para mejorar la productividad agrícola y el rendimiento de los cultivos (Barman and Bhattacharya, 2016).

A través de distintos estudios, se ha demostrado que los campos eléctricos y magnéticos, ya sean fuertes o débiles, pueden tener impactos tanto positivos como negativos en las plantas (Radhakrishnan, 2019; Sarraf et al., 2020). Por ejemplo, los campos eléctricos intensos pueden estimular el crecimiento y aumentar el rendimiento de las plantas, mientras que los campos magnéticos fuertes pueden incrementar la germinación y el crecimiento de las plántulas. Además, otras investigaciones han revelado que los campos eléctricos, magnéticos y corrientes de baja intensidad también pueden influir en las plantas. Se ha observado que los campos eléctricos débiles pueden provocar cambios a nivel celular, desencadenando respuestas de estrés como la acumulación de metabolitos secundarios (Janositz and Knorr, 2010; Odriozola-Serrano et al., 2009). En un mismo sentido, se ha notado que los campos magnéticos tenues pueden estimular el crecimiento y aumentar el contenido de proteínas en las plantas. Por otro lado, las corrientes eléctricas débiles han mostrado potenciar el crecimiento, la cantidad de hojas, el peso fresco y seco, así como el contenido de minerales y compuestos beneficiosos como carotenoides, compuestos fenólicos y clorofila. Aunque las vías de señalización que podrían ser afectadas por la electricidad aún no están completamente claras, se sugiere que esta puede influir en el potencial de membrana y, por ende, en la permeabilidad de los canales iónicos sensibles al voltaje. Esto podría llevar a una mayor absorción de los nutrientes disponibles, resultando en la acumulación de iones en las células vegetales. Asimismo, se plantea que la electricidad podría desencadenar

la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) (Gaspar et al., 2002; Vranona et al., 2002; Baby et al., 2011; Dannehl et al., 2012) lo que a su vez induciría la acumulación de compuestos fenólicos en las plantas. En la Figura 1 se presenta una semilla de maíz expuesta a un campo eléctrico débil, mostrando signos de interacción con esta energía en su entorno natural. La semilla parece estar íntegra y se observan posibles efectos visuales sutiles de la exposición al campo eléctrico, como una leve luminosidad o cambios en su apariencia externa.

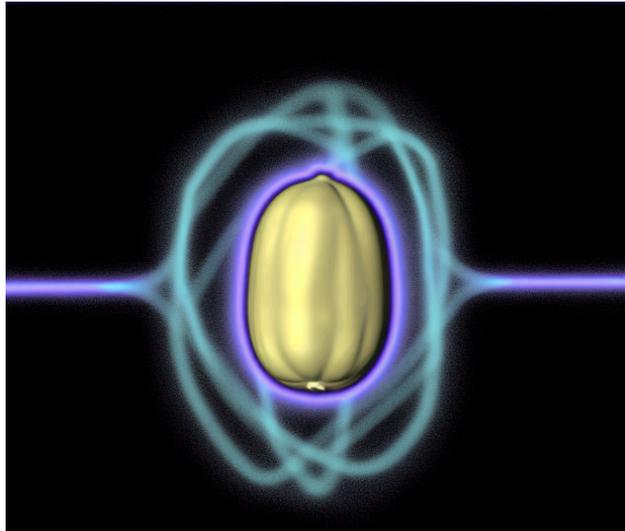


Figura 1. Representación de una semilla de maíz expuesta a un campo eléctrico débil. Fuente: Imagen generada por Cici, asistente de IA, en respuesta a una solicitud de un usuario el 19 de julio de 2024 a las 16:00. Indicación: generar una semilla recibiendo estímulo eléctrico

Los factores que influyen en la respuesta de las plantas a los campos eléctricos y magnéticos incluyen la intensidad del campo, la frecuencia, la orientación magnética, la duración de la exposición, la etapa de desarrollo de la planta, la variabilidad entre especies y las condiciones ambientales. Estos factores pueden estimular el crecimiento o la producción de metabolitos, pero también pueden resultar perjudiciales si no se controlan adecuadamente (González-Casado et al., 2018; Abobatta, 2019; Menegatti et al., 2019; Esehaghbeygi et al., 2021):

1. **Intensidad del Campo Eléctrico:** Los campos fuertes pueden ser perjudiciales, mientras que los débiles pueden estimular el crecimiento.
2. **Frecuencia del Campo:** Algunas frecuencias son más efectivas para promover el crecimiento o la producción de metabolitos.
3. **Orientación del Campo Magnético:** La orientación del campo magnético en relación con la planta influye en su respuesta.
4. **Duración de la Exposición:** Exposiciones cortas pueden ser estimulantes, pero exposiciones prolongadas pueden ser dañinas.
5. **Etapa de Desarrollo de la Planta:** Las semillas pueden ser más sensibles que las plantas adultas.
6. **Variabilidad entre Especies:** Diferentes especies vegetales responden de manera variada a estos estímulos.
7. **Condiciones Ambientales:** La temperatura, humedad y luz también impactan la respuesta de las plantas.

Todos los factores mencionados son importantes y deben considerarse cuidadosamente para comprender completamente cómo estos estímulos afectan a las plantas y semillas. Sin embargo, un factor especialmente relevante es la etapa de desarrollo de la planta. Esto se debe a que las plantas en diferentes etapas de crecimiento pueden tener respuestas distintas a los campos eléctricos y magnéticos, lo que puede influir significativamente en los resultados de los estudios. Es fundamental tener en cuenta este factor para

interpretar con precisión los efectos de estos estímulos en las plantas y semillas. Otro factor crucial a considerar en los estudios de exposición de plantas y semillas a campos eléctricos y magnéticos, es la orientación del campo. La forma en que el campo magnético está orientado en relación con las plantas puede tener un impacto significativo en cómo las plantas responden a estos estímulos. Cuando la orientación del campo magnético se alinea de cierta manera con la planta, puede modificar la forma en que las señales eléctricas y magnéticas interactúan con los procesos fisiológicos de la planta (Figura 2). La orientación del campo magnético puede influir en la absorción de nutrientes, la actividad enzimática, la división celular y otros procesos fisiológicos clave en las plantas. Por lo tanto, comprender y controlar la orientación del campo magnético es fundamental para investigar adecuadamente los efectos de estos campos en la biología vegetal. Algunas investigaciones sugieren que la orientación magnética puede modular la actividad de ciertos pigmentos fotosintéticos, como la clorofila, y también puede influir en la eficiencia de la captación de luz durante la fotosíntesis. Además, la orientación magnética puede afectar la actividad de las enzimas involucradas en las etapas bioquímicas de la fotosíntesis, lo que podría tener un impacto en la tasa de producción de carbohidratos y, por ende, en el crecimiento y desarrollo de las plantas.



Figura 2. Representación del proceso de interacción de un campo eléctrico débil con un conjunto de semillas. Fuente: Imagen generada por Cici, asistente de IA, en respuesta a una solicitud de un usuario el 19 de julio de 2024 a las 16:00: indicación generar una imagen de un electrocultivo.

Diversas investigaciones han mostrado beneficios específicos en las plantas luego de ser expuestas a campos eléctricos, tal como se detalla en la Tabla 1. Por ejemplo, se ha constatado que estos campos pueden mejorar la germinación de semillas en varias plantas como lechuga, rábano, tomate y trigo. Un estudio realizado por Zhang y Hashinaga (1997) evidenció que un campo eléctrico de corriente alterna (CA) de 18 a 105 kV/m favorece la germinación de semillas de lechuga y rábano. En la misma línea, se ha observado que los campos eléctricos estimulan el crecimiento de las plantas, incrementando la longitud de la raíz y el tallo, el peso fresco y seco, así como el rendimiento total. Por ejemplo, en la investigación de Ward (1996), se informó que una corriente eléctrica de 125 μA aplicada a plantas de tomate aumentó el peso fresco del tallo en un 13,3% y el peso seco en un 22%. Además, se ha constatado que estas exposiciones favorecen la absorción de nutrientes como calcio, potasio y magnesio; por ejemplo, el estudio de Ward (1996) mostró que una corriente eléctrica de 125 μA aumentó la absorción de calcio en un 16,6%, potasio en un 3,4% y magnesio en un 12,4%. Asimismo, se ha observado que los campos eléctricos potencian la producción de metabolitos secundarios, como compuestos fenólicos, en las plantas. Un ejemplo de ello es el estudio de Dannehl et al. (2009), que reveló un incremento del 46% en el contenido de compuestos fenólicos en las raíces de rábano cuando se trataron con una corriente eléctrica de 1000 mA durante una hora al día. Por último, se ha informado que los campos eléctricos mejoran la actividad antioxidante de las plantas, contribuyendo a protegerlas del estrés oxidativo. Por ejemplo, en la investigación de Dannehl et al. (2012), se documentó un aumento del 18% en la actividad antioxidante en los brotes de berro cuando se trataron con una corriente eléctrica de 1400 mA.

Tabla 1. Especies de plantas que han presentados efectos a la exposición de campos eléctricos y magnéticos fuertes.

Especie	Referencia	Especie	Referencia
<i>Arabidopsis thaliana</i>	Xu et al. (2017)	<i>Nicotiana tabacum</i>	Rathore et al. (1988)
<i>Amaranthus hypochondriacus</i>	Ozuna et al. (2017)	<i>Pisum sativum</i>	Belyavskaya (2004)
<i>Cicer arietinum</i>	Kaimoyo et al. (2008)	<i>Raphanus sativus</i>	Dannehl et al. (2009)
<i>Cucumis sativus</i>	Inaba et al. (1995)	<i>Solanum lycopersicum</i>	Vallverdu-Queralt et al. (2012)
<i>Glycine max</i>	Guderjan et al. (2005)	<i>Solanum scabrum</i>	Gogo et al. (2016)
<i>Helianthus annuus</i>	Fischer et al. (2004)	<i>Solanum tuberosum</i>	Rakosy-Tican et al. (2005)
<i>Hordeum vulgare</i>	Lebedev et al. (1977)	<i>Taxus chinensis</i>	Ye et al. (2004)
<i>Lepidium sativum</i>	Dannehl et al. (2012)	<i>Triticum aestivum</i>	Fischer et al. (2004)
<i>Medicago truncatula</i>	Kaimoyo et al. (2008)	<i>Zea mays</i>	Guderjan et al. (2005)

La exposición a campos magnéticos intensos ha sido objeto de diversas investigaciones que han explorado sus efectos en el crecimiento de las plantas. Se destaca que la aplicación de campos magnéticos fuertes, medidos en densidad de flujo magnético (MFD), puede estimular la germinación, el crecimiento de raíces y tallos, así como el rendimiento general de las plantas. Por ejemplo, estudios realizados en okra, garbanzo, girasol, mitsuba, trigo y tomate han demostrado que tratamientos con campos magnéticos robustos, como 99 mT durante 3 minutos, 50 mT durante 2 horas, 200 mT durante 2 horas, 0,75 mT durante 16 días, 7 mT durante 7 días y 160 mT durante 1 minuto, respectivamente, favorecen la germinación de las plantas (Cakmak et al., 2010; De Souza et al., 2010; Kobayashi et al., 2004; Naz et al., 2012; Vashisth and Nagarajan, 2008, 2010). Asimismo, se ha observado un impacto positivo en la longitud de raíces y brotes en semillas de garbanzo y girasol tratadas con campos magnéticos de 50 mT durante 2 horas (Vashisth and Nagarajan, 2008, 2010). Además, se ha constatado que la exposición continua a campos magnéticos sólidos en semillas de maíz, 125 mT durante 1 hora y 250 mT durante 10 minutos, resulta en plantas más altas y pesadas en comparación con las plantas de control (Florez et al., 2007). Por otro lado, se ha evidenciado que el tratamiento con campos magnéticos intensos, como 125 mT durante 1 minuto a 24 horas, acelera el crecimiento de plantas de cebada y guisantes, con los mayores incrementos observados cuando las semillas son expuestas durante 24 horas (Carbonell et al., 2011; Martínez et al., 2000). El tratamiento de semillas de soja con campos magnéticos sólidos de 0 a 300 mT en intervalos de 50 mT ha mostrado un significativo aumento en la longitud de plántulas, peso fresco y peso seco, siendo los tratamientos de 200 mT y 150 mT durante 60 minutos los más efectivos en estos parámetros (Shine et al., 2011). Por otro lado, la exposición de semillas de tomate a un campo magnético de 0.9 T durante 30 minutos resultó en un incremento del 1.76 veces en la cantidad de ramas por planta (Dayal and Singh, 1986). Además, se observó que el tratamiento con un campo magnético de 100 mT durante 10 minutos en semillas de tomate incrementó el área foliar en un 58% y el peso seco de las hojas en un 44% (De Souza et al., 2006). Se ha constatado también un aumento en la producción de frutas en un 18% y la acumulación de iones en las hojas (calcio y magnesio) de plantas de fresa al aplicar una MFD de 0,096 T con una frecuencia de 50 Hz (Esitken and Turan, 2004). Asimismo, se han observado efectos divergentes que pueden generar los campos magnéticos intensos en diferentes especies de plantas, como lo evidencian semillas de maíz y canola expuestas a 10 mT durante 15 minutos: el crecimiento de la canola se vio reducido mientras que el maíz mostró un aumento en su desarrollo (Shabangi et al., 2010). Cabe destacar que la exposición de semillas de alubia francesa a un campo magnético de 1.8 mT durante 30 minutos diarios durante 10 días resultó en una disminución de la tasa de germinación y del contenido de clorofila y flavonoides (Najafi et al., 2013). Por último, los sistemas antioxidantes de defensa, como la peroxidasa (POD), la superóxido dismutasa (SOD) y la catalasa (CAT), regulan el equilibrio entre la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS) y su neutralización. En relación con las aplicaciones de campos magnéticos, los resultados sugieren que la exposición a una mayor MFD desencadena la producción de ROS y cambios en la actividad enzimática (Baby et al., 2011). En la tabla 2 se presenta un resumen de los efectos observados en diferentes especies de plantas tras la exposición a campos magnéticos.

Tabla 2. Efectos de la exposición a campos magnéticos en el crecimiento de diferentes especies de plantas.

Planta	Intensidad del Campo Magnético	Duración del Tratamiento	Efectos Observados	Referencia
Okra	99 mT	3 min.	Estimula la germinación	Cakmak et al., 2010
Garbanzo	50 mT	2 h	Estimula el crecimiento de raíces y tallos	De Souza et al., 2010
Girasol	50 mT	2 h	Impacto positivo en la longitud de raíces y brotes	Vashisth and Nagarajan, 2008, 2010
Mitsuba	200 mT	2 h	Favorece la germinación	Kobayashi et al., 2004
Trigo	0.75 mT	16 d	Estimula la germinación	Naz et al., 2012
Tomate	7.0 mT	7 d	Favorece la germinación	Vashisth and Nagarajan, 2008, 2010
Maíz	125 mT	1 h	Plantas más altas y pesadas	Florez et al., 2007
Cebada	125 mT	1 min a 24 h	Acelera el crecimiento	Carbonell et al., 2011
Guisantes	125 mT	1 min a 24 h	Acelera el crecimiento	Martinez et al., 2000
Soja	0 a 300 mT	60 min	Aumento en longitud de plántulas, peso fresco y peso seco	Shine et al., 2011
Tomate	0.9 T	30 min	Incrementa la cantidad de ramas	Dayal and Singh, 1986
Tomate	100 mT	10 min	Aumenta área foliar	De Souza et al., 2006
Fresa	0.096 mT	-	Aumento en producción de frutos	Esitken and Turan, 2004
Maíz	10 mT	15 min.	Efectos divergentes en crecimiento	Shabrangi et al., 2010
Alubia francesa	1.8 mT	30 min. diarios durante 10 días	Disminución en germinación, contenido de clorofila y falvonoides	Najafi et al., 2013

Discusión

Los estudios actuales ofrecen evidencia contundente sobre los efectos de los campos eléctricos y magnéticos en las plantas. Por ejemplo, se ha observado que los campos eléctricos pueden aumentar las tasas de germinación de semillas, lo que podría conducir a una emergencia de cultivos más rápida y uniforme, particularmente beneficioso en regiones con temporadas de crecimiento cortas o donde la siembra temprana es vital para obtener rendimientos óptimos. Por otro lado, el tratamiento de semillas con campos magnéticos puede mejorar la germinación, el crecimiento de plántulas y el rendimiento de los cultivos. Es claro que la intensidad del campo ejerce una influencia significativa en los efectos observados en las plantas. Por ejemplo, los campos eléctricos débiles podrían potenciar la absorción de nutrientes, aumentar la síntesis de metabolitos secundarios y reforzar la resistencia al estrés en las plantas. En contraste, la exposición a campos magnéticos débiles durante el crecimiento de las plantas podría resultar en un incremento del rendimiento de los cultivos, tanto en biomasa como en producción de frutos (Saletnik et al., 2022).

La orientación magnética puede impactar la absorción de nutrientes al influir en los procesos fisiológicos y bioquímicos relacionados con la toma de nutrientes del suelo (Poinapen, Beeharry, and Brown, 2013). La interacción entre la orientación del campo magnético y las raíces de las plantas puede modificar la permeabilidad de las membranas celulares, la actividad de los transportadores de nutrientes y la distribución de iones en las células vegetales. Algunas investigaciones han sugerido que la orientación magnética puede alterar la absorción de minerales y nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, como el hierro, calcio, potasio y magnesio. Esta influencia en la absorción de nutrientes puede tener un impacto significativo en el metabolismo (Kavi, 1977; Belyavskaya, 2004; Galland and Pazur, 2005; Aladjadjyan, 2007) y desarrollo de las plantas, subrayando la importancia de estudiar cómo la orientación magnética puede modular la disponibilidad y asimilación de nutrientes en respuesta a los campos eléctricos y magnéticos. Los beneficios observados entre los campos eléctricos y magnéticos difieren notoriamente.

Asimismo, los campos eléctricos pueden actuar como elicitores abióticos (De Pascual-Teresa and Sanchez-Ballesta et al., 2008; Martinez-Ballesta et al., 2008; Poiroux-Gonord et al., 2010; Treutter, 2010), activando

las defensas naturales de las plantas contra plagas y enfermedades y potencialmente reduciendo la necesidad de pesticidas químicos, los campos magnéticos pueden potenciar la actividad de enzimas antioxidantes en las plantas, fortaleciendo su resistencia a enfermedades. La exposición a campos eléctricos podría incrementar la producción de metabolitos secundarios, como compuestos fenólicos, que mejoran la calidad de los productos agrícolas. Por otro lado, se ha demostrado que los campos magnéticos pueden mejorar la calidad de ciertos productos agrícolas, incluyendo el contenido de nutrientes, color y textura.

Existe una amplia variedad de estudios sobre este tema; sin embargo, se necesita llevar a cabo más investigaciones para definir los parámetros óptimos (intensidad, duración, frecuencia, etc.) para la aplicación de electricidad en diversas especies de plantas y en condiciones ambientales diversas. Es crucial continuar investigando posibles vías de señalización activadas por los tratamientos con electricidad. Esto implica realizar análisis de expresión genética para encontrar los mecanismos moleculares que explican cómo la electricidad puede mejorar los metabolitos secundarios en las plantas. Resulta fundamental emplear herramientas que posibiliten la medición en tiempo real de fitoseñales, como la fotosíntesis, la transpiración, la conductancia estomática, la temperatura de las hojas, entre otros, durante los tratamientos con electricidad para identificar las respuestas de las plantas. Asimismo, es esencial evaluar la viabilidad económica de integrar estas tecnologías en un contexto práctico y desarrollar métodos efectivos para implementar la estimulación eléctrica en entornos de campo.

Conclusión

En conclusión, la aplicación de electricidad en sus diversas formas, como campos eléctricos, magnéticos o corrientes, se presenta como un elicitador de estrés abiótico que impacta en las plantas. Los estudios han demostrado que existen más beneficios que desventajas al utilizar campos eléctricos y magnéticos, ya sean fuertes o débiles, así como campos magnéticos o corrientes eléctricas en las plantas. Es notable que el pretratamiento de las semillas con campos eléctricos y magnéticos representa un método sencillo para mejorar el crecimiento posterior de las plantas, influyendo positivamente en diversos aspectos como la tasa de germinación, el desarrollo de raíces y brotes, el peso fresco y seco, el rendimiento de los frutos, así como en la expansión del follaje, las ramificaciones, la fotosíntesis, la conductancia estomática, la acumulación de iones y el contenido de clorofila.

En adición, se destaca que la aplicación de campos eléctricos y magnéticos como pretratamiento en las semillas no solo mejora aspectos relacionados con el crecimiento y desarrollo de las plantas, sino que también puede influir en su resistencia a condiciones ambientales adversas, su capacidad de adaptación y su respuesta a situaciones de estrés. Esta técnica prometedora abre nuevas perspectivas en la agricultura al ofrecer un enfoque innovador para potenciar la productividad de los cultivos y mejorar la calidad de los alimentos, lo que subraya su potencial para contribuir significativamente al avance de la ciencia agrícola y la sostenibilidad en la producción de alimentos.

Referencias bibliográficas

1. Abobatta, W.F., **2019**. Overview of Role of Magnetizing Treated Water in Agricultural Sector Development. *Adv. Agric. Technol. Plant Sci.* 2:180023.
2. Aladjajjyan, A., 2007. The use of physical methods for plant growing stimulation in Bulgaria. *J. Cent. Eur. Agric.* 8: 369–380.
3. Baby, S.M., Narayanaswamy, G.K., Anand, A., 2011. Superoxide radical production and performance index of photosystem II in leaves from magnetoprimed soybean seeds. *Plant Signal. Behav.* 6, 1635–1637.
4. Barman, P., and Bhattacharya, R., 2016. Impact of Electric and Magnetic Field Exposure on Young Plants- A Review. *Int.J.Curr.Res.Aca.Rev.*2016; 4(2): 182-192
5. Belyavskaya, N.A., 2004. Biological effects due to weak magnetic field on plants. *Adv. Space Res.* 34: 1566–1574.
6. Cakmak, T., Dumlupinar, R., Erdal, S., 2010. Acceleration of germination and early growth of wheat and bean seedlings grown under various magnetic field and osmotic conditions. *Bioelectromagnetics* 31: 120–129.
7. Carbonell, M.V., Florez, M., Martinez, E., Maqueda, R., Amaya, J.M., 2011. Study of stationary magnetic fields on initial growth of pea (*Pisum sativum* L.) seeds. *Seed Sci. Technol.* 39: 673–679.

8. Dannehl, D., Huyskens-Keil, S., Eichholz, I., Ulrichs, C., Schmidt, U., 2009. Effects of intermittent-direct-electric-current (IDC) on polyphenols and antioxidant activity in radish (*Raphanus sativus L.*) during growth. *J. Appl. Bot.-Angew. Bot.* 83: 54–59.
9. Dannehl, D., Huyskens-Keil, S., Wendorf, D., Ulrichs, C., Schmidt, U., 2012. Influence of intermittent-direct-electric-current (IDC) on phytochemical compounds in garden cress during growth. *Food Chem.* 131: 239–246.
10. Dayal, S., Singh, R.P., 1986. Effects of seed exposure to magnetic-fields on the height of tomato plants. *Indian J. Agric. Sci.* 56: 483–486.
11. De Pascual-Teresa, S., Sanchez-Ballesta, M., 2008. Anthocyanins: from plant to health. *Phytochem. Rev.* 7: 281–299.
12. De Souza, A., Garcia, D., Sueiro, L., Gilart, F., Porras, E., Licea, L., 2006. Pre-sowing magnetic treatments of tomato seeds increase the growth and yield of plants. *Bioelectromagnetics* 27: 247–257.
13. De Souza, A., Sueiro, L., Garcia, D., Porras, E., 2010. Extremely low frequency non-uniform magnetic fields improve tomato seed germination and early seedling growth. *Seed Sci. Technol.* 38: 61–72.
14. Esehaghbeygi, A.; Hajisadeghian, A.; Nasrabad, M.N., **2021**. Role of a corona field application in the physicochemical properties of stored strawberries. *Res. Agric. Eng.* 67: 58–64.
15. Esitken, A., Turan, M., 2004. Alternating magnetic field effects on yield and plant nutrient element composition of strawberry (*Fragaria x ananassa cv. Camarosa*). *Acta Agric. Scand. B-S P* 54, 135–139.
16. Fischer, G., Tausz, M., Kock, M., Grill, D., 2004. Effects of weak 162/3 Hz magnetic fields on growth parameters of young sunflower and wheat seedlings. *Bioelectromagnetics* 25: 638–641.
17. Florez, M., Carbonell, M.V., Martinez, E., 2007. Exposure of maize seeds to stationary magnetic fields: effects on germination and early growth. *Environ. Exp. Bot.* 59: 68–75.
18. Galland, P.; Pazur, A., 2005. Magnetoreception in plants. *J. Plant Res.* 118: 371–389.
19. Gaspar, T., Franck, T., Bisbis, B., Kevers, C., Jouve, L., Hausman, J.F., Dommes, J., 2002. Concepts in plant stress physiology. Application to plant tissue cultures. *Plant Growth Regul.* 37:263–285.
20. Gogo, E.O., Huyskens-Keil, S., Krimlowski, A., Ulrichs, C., Schmidt, U., Opiyo, A., Dannehl, D., 2016. Impact of direct-electric-current on growth and bioactive compounds of African nightshade (*Solanum scabrum Mill.*) plants. *J. Appl. Bot.-Angew. Bot.* 89: 60–67.
21. González-Casado, S.; Martín-Belloso, O.; Elez-Martínez, P.; Soliva-Fortuny, R., 2018. Application of pulsed electric fields to tomato fruit for enhancing the bioaccessibility of carotenoids in derived products. *Food Funct.* 9: 2282–2289.
22. Guderjan, M., Topfl, S., Angersbach, A., Knorr, D., 2005. Impact of pulsed electric field treatment on the recovery and quality of plant oils. *J. Food Eng.* 67: 281–287.
23. Inaba, A., Manabe, T., Tsuji, H., Iwamoto, T., 1995. Electrical impedance analysis of tissue properties associated with ethylene induction by electric currents in cucumber (*Cucumis sativus L.*) fruit. *Plant Physiol.* 107: 199–205.
24. Janositz, A., Knorr, D., 2010. Microscopic visualization of pulsed electric field induced changes on plant cellular level. *Innov. Food Sci. Emerg.* 11: 592–597.
25. Kaimoyo, E., Farag, M.A., Sumner, L.W., Wasmann, C., Cuello, J.L., VanEtten, H., 2008. Sub-lethal levels of electric current elicit the biosynthesis of plant secondary metabolites. *Biotechnol. Progr.* 24: 377–384.
26. Kavi, P., 1977. The effect of magnetic treatment of soybean seed on its moisture absorbing capacity. *Sci. Cult. Calcutta.* 405–406.
27. Kobayashi, M., Soda, N., Miyo, T., Ueda, Y., 2004. Effects of combined DC and AC magnetic fields on germination of hornwort seeds. *Bioelectromagnetics* 25: 552–559.
28. Lebedev, S.I., Baranskiy, P.I., Litvinenko, L.G., Shiyan, L.T., 1977. Barley growth in superweak magnetic field. *Electron Treat. Mater.* 3: 71–73.
29. Martínez-Ballesta, M.C., Lopez-Perez, L., Hernandez, M., Lopez-Berenguer, C., Fernandez- Garcia, N., Carvajal, M., 2008. Agricultural practices for enhanced human health. *Phytochem. Rev.* 7: 251–260.
30. Martínez, E., Carbonell, M.V., Amaya, J.M., 2000. A static magnetic field of 125 mT stimulates the initial growth stages of barley (*Hordeum vulgare L.*). *Electro Magnetobiol.* 19: 271–277.
31. Menegatti, R.D.; Oliveira de Oliveira, L.; Costa, A.; Braga, E.J.B.; Bianchi, V.J., **2019**. Magnetic field and gibberlic acid as pre-germination treatment of passion fruit seeds. *Ciência Agrícola.* 17: 5–22.
32. Najafi, S., Heidari, R., Jamei, R., 2013. Influence of silver nanoparticles and magnetic field on phytochemical, antioxidant activity compounds and physiological factors of *Phaseolus vulgaris*. *Tech. J. Eng. App. Sci.* 3: 2812–2816.
33. Naz, A., Jamil, Y., ul Haq, Z., Iqbal, M., Ahmad, M.R., Ashraf, M.I., Ahmad, R., 2012. Enhancement in the germination, growth and yield of Okra (*Abelmoschus esculentus*) using pre-sowing magnetic treatment of seeds. *Indian J. Biochem. Biophys.* 49: 211–214.
34. Odriozola-Serrano, I., Soliva-Fortuny, R., Hernandez-Jover, T., Martín-Belloso, O., 2009. Carotenoid and phenolic profile of tomato juices processed by high intensity pulsed electric fields compared with conventional thermal treatments. *Food Chem.* 112: 258–266.

35. Ozuna, C., Cerón-García, A., Sosa-Morales, M.E., Salazar, J.A.G., León-Galván, M.F., del Rosario Abraham-Juárez, M., 2017. Electrically induced changes in amaranth seed enzymatic activity and their effect on bioactive compounds content after germination. *J. Food Sci. Technol.* 1–10.
36. Poinapen, D.; Beeharry, G.K.; Brown, D.C., 2013. Seed orientation and magnetic field strength have more influence on tomato seed performance than relative humidity and duration of exposure to non-uniform static magnetic fields. *J. Plant Physiol.* 170: 1251–1258.
37. Poiroux-Gonord, F., Bidel, L.P.R., Fanciullino, A.-L., Gautier, H., Lauri-Lopez, F., Urban, L., 2010. Health benefits of vitamins and secondary metabolites of fruits and vegetables and prospects to increase their concentrations by agronomic approaches. *J. Agric. Food Chem.* 58: 12065–12082.
38. Radhakrishnan, R., 2019. Magnetic field regulates plant functions, growth and enhances tolerance against environmental stresses. *Physiol Mol Biol Plants.* 25(5):1107-1119.
39. Rakosy-Tican, L., Aurori, C.M., Morariu, V.V., 2005. Influence of near null magnetic field on in vitro growth of potato and wild Solanum species. *Bioelectromagnetics* 26: 548–557.
40. Rathore, K.S., Hodges, T.K., Robinson, K.R., 1988. A refined technique to apply electrical currents to callus-cultures. *Plant Physiol.* 88: 515–517.
41. Saletnik, Bogdan, Grzegorz Zaguła, Aneta Saletnik, Marcin Bajcar, Ewelina Słysz, and Czesław Puchalski. 2022. Effect of Magnetic and Electrical Fields on Yield, Shelf Life and Quality of Fruits. *Applied Sciences* 12, (6): 3183.
42. Sarraf, M., Kataria, S., Taimourya, H., Santos, L.O., Menegatti, R.D., Jain, M., Ihtisham, M., Liu, S., 2020. Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview. *Plants (Basel).* 3; 9(9):1139.
43. Shabrangi, A., Majd, A., Sheidai, M., Nabyouni, M., Dorranean, D., 2010. Comparing effects of extremely low frequency electromagnetic fields on the biomass weight of C3 and C4 plants in early vegetative growth. *Electromagn. Res.* 593–598.
44. Treutter, D., 2010. Managing phenol contents in crop plants by phytochemical farming and breeding-visions and constraints. *Int. J. Mol. Sci.* 11: 807–857.
45. Shabrangi, A., Majd, A., Sheidai, M., Nabyouni, M., Dorranean, D., 2010. Comparing effects of extremely low frequency electromagnetic fields on the biomass weight of C3 and C4 plants in early vegetative growth. *Electromagn. Res.* 593–598.
46. Shine, M.B., Guruprasad, K.N., Anand, A., 2011. Enhancement of germination, growth, and photosynthesis in soybean by pre-treatment of seeds with magnetic field. *Bioelectromagnetics* 32: 474–484.
47. Vallverdu-Queralt, A., Oms-Oliu, G., Odriozola-Serrano, I., Lamuela-Raventos, R.M., Martin-Belloso, O., Elez-Martinez, P., 2012. Effects of pulsed electric fields on the bioactive compound content and antioxidant capacity of tomato fruit. *J. Agric. Food Chem.* 60: 3126–3134.
48. Vashisth, A., Nagarajan, S., 2008. Exposure of seeds to static magnetic field enhances germination and early growth characteristics in chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Bioelectromagnetics* 29: 571–578.
49. Vashisth, A., Nagarajan, S., 2010. Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus*) seeds exposed to static magnetic field. *J. Plant Physiol.* 167: 149–156.
50. Vranova, E., Inze, D., Van Breusegem, F., 2002. Signal transduction during oxidative stress. *J. Exp. Bot.* 53: 1227–1236.
51. Ward, R.G., 1996. The influence of electric currents on the growth of tomato plants. *Acta Physiol. Plant.* 18: 121–127.
52. Xu, C.X., Yu, Y., Zhang, Y.X., Li, Y., Wei, S.F., 2017. Gibberellins are involved in effect of near-null magnetic field on Arabidopsis flowering. *Bioelectromagnetics* 38: 1–10.
53. Ye, H., Huang, L.L., Chen, S.D., Zhong, J.J., 2004. Pulsed electric field stimulates plant secondary metabolism in suspension cultures of *Taxus chinensis*. *Biotechnol. Bioeng.* 88: 788–795.
54. Zhang, H., Hashinaga, F., 1997. Effect of high electric fields on the germination and early growth of some vegetable seeds. *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 66: 347–352.