

Optimización de la Germinación de maíz (*Zea mays*) mediante Electrocultivo: Análisis de Parámetros Botánicos y Bioquímicos

Optimization of maize (*Zea mays*) Germination by Electroculture: Analysis of Botanical and Biochemical Parameters

Luis Ángel Rodríguez Montelongo, Daniela Giovanna Ramírez Mendoza, Aura Alicia Rosas Aguirre, Mario Josué Aguilar Méndez, Berenice Noriega Luna*

Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Departamento de Ingeniería Civil-Ambiental.
berenice.noriega@ugto.mx*

Resumen

El electrocultivo es una técnica sostenible que utiliza campos eléctricos para estimular los procesos fisiológicos de las plantas y favorecer su desarrollo. Este estudio evaluó su aplicación en la germinación del maíz (*Zea mays*), cultivo de gran relevancia económica y cultural en México. Las semillas se expusieron a campos eléctricos de 0.2, 0.4 y 0.8 V/cm durante 4, 8 y 12 horas, analizando la tasa de germinación, la longitud y diámetro del tallo, la longitud radicular, el número de hojas y la concentración de clorofila a, b, carotenoides y proteínas totales. Los resultados mostraron que los campos de 0.2 y 0.8 V/cm durante 12 horas promovieron la mayor tasa de germinación, mientras que 0.4 V/cm favoreció el desarrollo radicular y del tallo. A nivel local, estos hallazgos sugieren que la técnica puede aplicarse en huertos escolares, comunitarios o de pequeña escala para mejorar la eficiencia productiva. De forma más amplia, el electrocultivo representa una alternativa sostenible para incrementar la productividad agrícola con bajo impacto ambiental, contribuyendo a la seguridad alimentaria y a la transición hacia prácticas agrícolas más resilientes.

Palabras clave: Electrocultivo; *Zea mays*; Germinación.

Introducción

La semilla, principal órgano reproductivo de la mayoría de las plantas terrestres y acuáticas, es fundamental para la renovación, persistencia y dispersión de las poblaciones vegetales, así como para la producción agrícola, la regeneración de bosques y la sucesión ecológica (Doria, 2010). Su ciclo vital comienza con la germinación, un proceso complejo que comprende tres fases: la imbibición, caracterizada por la entrada de agua y la hidratación de tejidos; la fase *sensu stricto*, en la que se activa el metabolismo tras una disminución de la absorción de agua; y la fase de crecimiento, marcada por la emergencia de la radícula, punto de no retorno del proceso, ya que, si no se completa, la semilla muere (Pita & Pérez, 2019). Comprender estos procesos es crucial para optimizar la producción agrícola y la conservación de la biodiversidad.

El maíz (*Zea mays*), originario de México y cultivado en el país desde hace aproximadamente siete mil años (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023), representa una semilla de gran importancia económica, cultural y alimentaria. Su domesticación marcó un hito en la historia de Mesoamérica, al propiciar el establecimiento de las primeras comunidades agrícolas y consolidarse como un pilar fundamental de la dieta actual. Con un consumo promedio de 331.9 kg por persona al año en México (Secretaría de Salud, 2024), el maíz destaca por su adaptabilidad y la amplia diversidad de variedades cultivadas (Plancarte et al., 2014). A nivel individual, una semilla de maíz presenta un peso promedio de 0.41 ± 0.051 g y una longitud de 1.30 ± 0.16 cm, con un porcentaje de germinación del $81 \pm 12\%$ (González et al., 2016).

El creciente aumento de la población mundial demanda un incremento significativo en la producción de alimentos para garantizar la seguridad alimentaria. En 2016, más de 800 millones de personas sufrieron desnutrición (National Geographic, 2025). Aunque los fertilizantes químicos y los cultivos transgénicos han contribuido al aumento de la productividad agrícola, su uso excesivo genera impactos negativos sobre el ambiente y la salud humana (González, 2019; Acosta, 2002; Arias et al., 2017). El empleo intensivo de fertilizantes, con un consumo global promedio de 181.9 millones de toneladas anuales, se asocia con procesos de eutrofización, contaminación del agua y del aire, degradación del suelo y pérdida de

biodiversidad (González, 2016). Asimismo, aunque los cultivos transgénicos han incrementado la producción de maíz en un 600% durante los últimos 55 años (Arias et al., 2017), se les atribuyen posibles riesgos relacionados con la toxicidad, la aparición de alergias y la resistencia a antibióticos (Acosta, 2002).

En este contexto, el **electrocultivo** se presenta como una alternativa sostenible y de bajo impacto ambiental para potenciar la producción agrícola. Esta técnica emplea la estimulación eléctrica para modificar el metabolismo celular y regular el crecimiento vegetal mediante la aplicación controlada de campos eléctricos o electromagnéticos. Dichos estímulos modulan la permeabilidad de las membranas celulares, la absorción de nutrientes y la actividad enzimática, lo que puede traducirse en una mejora de la germinación, el desarrollo de plántulas y la tolerancia al estrés térmico (Goldsworthy, 2008; Li et al., 2019).

Diversos estudios han demostrado el potencial del electrocultivo en especies agrícolas de interés, evidenciando mejoras en la germinación, el crecimiento y la productividad vegetal. De Souza et al. (2010) reportaron un aumento significativo en la germinación y el crecimiento de plántulas de tomate al aplicar campos magnéticos de baja frecuencia (160 y 200 mT durante 1 minuto). Martínez (2014) observó un incremento del 2% en la germinación de maíz con corrientes eléctricas de 80, 100 y 120 mA, mientras que Mroczeck et al. (2016) registraron que, en altramuces, los campos magnéticos de baja frecuencia (0.2 mT, 16 y 50 Hz) modificaron la concentración de clorofila y la actividad de la guaiacol peroxidasa (GPOX) según la frecuencia aplicada. Carbonell et al. (2000) documentaron un aumento del 13% en la germinación de arroz tras 72 horas a 150 mT, frente a un 3% en el grupo control, y Zepeda et al. (2019) reportaron un incremento de 9 cm en la altura de plantas de maíz y un 1% en el rendimiento del grano con campos electromagnéticos de 3.6 mT durante 6, 12 y 24 minutos. De manera similar, Acosta & Bustos (2016) registraron un aumento del 30% en la germinación de *Lolium perenne* con campos eléctricos de 0.2 V/cm y una duplicación en la altura de plántulas a 0.1 V/cm, mientras que Ries et al. (2023) observaron que, en semillas de frijol, una intensidad de 945 V/cm elevó la germinación al 48.8% en comparación con el 27.7% del grupo control. En conjunto, estos resultados confirman que la estimulación eléctrica, aplicada con una intensidad óptima, puede potenciar la germinación, el crecimiento y la supervivencia de las plántulas, además de reducir la peroxidación de lípidos de membrana bajo condiciones de estrés por calor (Goldsworthy, 2008). Tales evidencias respaldan el potencial del electrocultivo como una alternativa innovadora y ecológica para optimizar la producción agrícola, particularmente en sistemas de pequeña y mediana escala.

A pesar de los avances en la comprensión de los efectos de la estimulación electromagnética, persisten vacíos en torno a los mecanismos fisiológicos implicados y a la determinación de condiciones óptimas de aplicación para distintas especies. En este contexto, el presente trabajo busca analizar el efecto de campos eléctricos de 0.2, 0.4 y 0.8 V/cm, con tiempos de exposición de 4, 8 y 12 horas, sobre la germinación y el crecimiento de *Zea mays*, evaluando parámetros botánicos y bioquímicos. Este estudio se orienta a generar conocimiento aplicable tanto en escenarios locales como en proyecciones de mayor escala. A corto plazo, los resultados pueden aprovecharse en huertos escolares, comunitarios o experimentales, donde el electrocultivo ofrece una alternativa accesible y de bajo costo para optimizar la germinación. A largo plazo, su comprensión y validación pueden contribuir al desarrollo de prácticas agrícolas más sostenibles, con potencial de adaptación a sistemas de cultivo a nivel regional o nacional, fortaleciendo la seguridad alimentaria y la eficiencia productiva en México.

Metodología

Para el desarrollo de la investigación se diseñó la siguiente metodología, estructurada en etapas sucesivas que aseguran la homogeneidad y la reproducibilidad del experimento.

- Selección y Preparación de Semillas.** Se seleccionaron semillas de *Zea mays* de tamaño y apariencia similares para garantizar la uniformidad experimental. Se utilizaron cincuenta semillas por tratamiento, incluyendo un grupo control. Previo a la siembra, las semillas se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio al 5% durante 30 segundos y se enjuagaron con agua destilada. Posteriormente, se dejaron secar para prevenir la proliferación de hongos y bacterias.
- Diseño del Sistema de Electrocultivo.** Se adaptó una bandeja plástica rectangular como cámara de estimulación. Se implementó una configuración bidimensional (2D) de electrodos, con un electrodo central que actuó como cátodo y seis ánodos dispuestos simétricamente alrededor. Esta disposición permitió una exposición uniforme del campo eléctrico sobre las semillas. Los siete electrodos (un cátodo y seis ánodos) se conectaron en serie mediante un cable de cobre calibre 10 AWG, minimizando la resistencia y las pérdidas de energía. La Figura 1 muestra el esquema del sistema de electrocultivo.

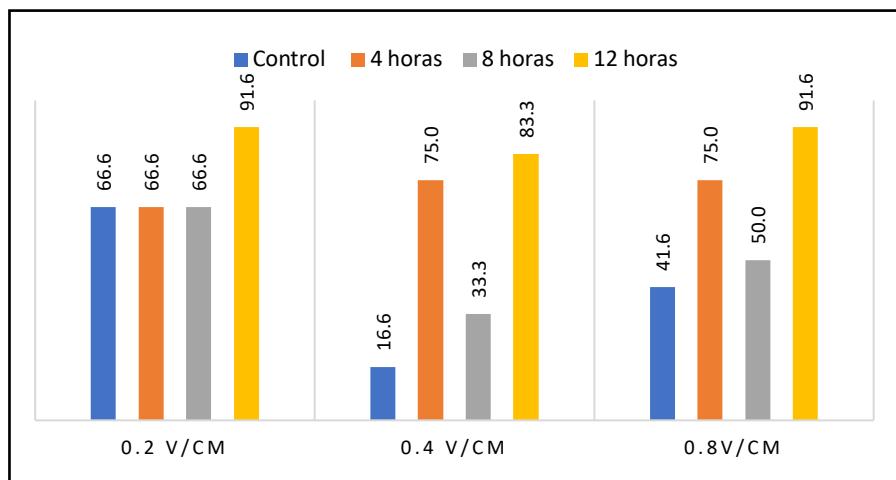


Figura 1. Sistema de electrocultivo empleado en el estudio. Fotografía del sistema experimental real, mostrando la fuente de poder conectada a la bandeja plástica utilizada como cámara de germinación (Elaboración propia).

- c) **Parámetros de Electroestimulación.** Las semillas se expusieron a intensidades de campo eléctrico de 0.2, 0.4 y 0.8 V/cm durante 4, 8 y 12 horas. Cada condición experimental incluyó doce semillas por réplica. Tras la estimulación, las semillas se retiraron cuidadosamente de la bandeja y se trasladaron a cámaras de germinación para su desarrollo. Esta fase permitió evaluar la influencia tanto de la intensidad como de la duración de la estimulación eléctrica.
- d) **Condiciones de Germinación.** Posteriormente, las semillas se colocaron en cámaras de germinación con temperatura constante de 25 °C, controlada mediante tapete térmico durante 12 días. Se empleó iluminación LED roja para favorecer la activación de fitocromos y luz LED azul para promover el crecimiento vegetal y la activación de criptocromos (Paniagua et al., 2015). Se mantuvo un riego constante con agua corriente para compensar la evaporación y garantizar condiciones estables de humedad.
- e) **Mediciones Botánicas y bioquímicas.** Doce días después de la siembra, se realizaron mediciones de longitud de raíz y tallo, diámetro del tallo y número de hojas por planta. Estas variables permitieron comparar los efectos de las intensidades y los tiempos de exposición al campo eléctrico frente al grupo control. Adicionalmente, se evaluaron parámetros bioquímicos: la cuantificación de clorofila, mediante el método de Lichtenthaler & Buschmann (2001), y la concentración de proteínas totales, determinada según el método de Bradford (1976).

Resultados y discusión

El análisis de la tasa de germinación, realizado doce días después de la siembra, mostró un comportamiento diferencial en función de la intensidad y duración de los campos eléctricos aplicados (Gráfica 1). Los tratamientos con 0.2 y 0.8 V/cm durante 12 horas presentaron la mayor tasa de germinación, alcanzando un 91.6%, cifra significativamente superior a los grupos control (66.6% y 41.6%, respectivamente). Este hallazgo sugiere que una estimulación eléctrica de baja intensidad y mayor duración puede favorecer la germinación en semillas de *Zea mays*.



Gráfica 1. Tasa de germinación de semillas de *Zea mays* después de 12 días, a diferentes intensidades de campo eléctrico (0.2, 0.4 y 0.8 V/cm) y tiempos de exposición (4, 8 y 12 horas).

A las cuatro horas de exposición, la tasa de germinación fue mayor en los tratamientos de 0.4 y 0.8 V/cm en comparación con 0.2 V/cm. Sin embargo, tras 12 horas de exposición, todos los tratamientos eléctricos superaron los resultados de las exposiciones más cortas (4 y 8 horas). Estos resultados concuerdan parcialmente con los de Martínez (2014), quien reportó un efecto deletéreo en la germinación a medida que aumentaban la intensidad del campo y el tiempo de exposición. La Figura 2 ilustra las diferencias visuales en el desarrollo de las plántulas según los tratamientos. En particular, la mayor tasa observada en 0.2 V/cm a 12 horas podría deberse a una estimulación suave que activa los procesos fisiológicos sin causar daño celular.

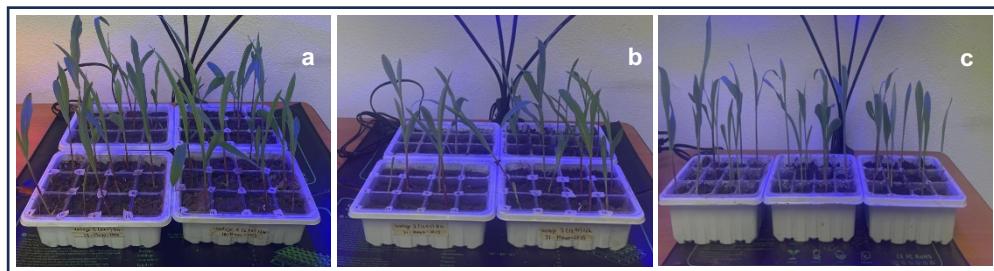
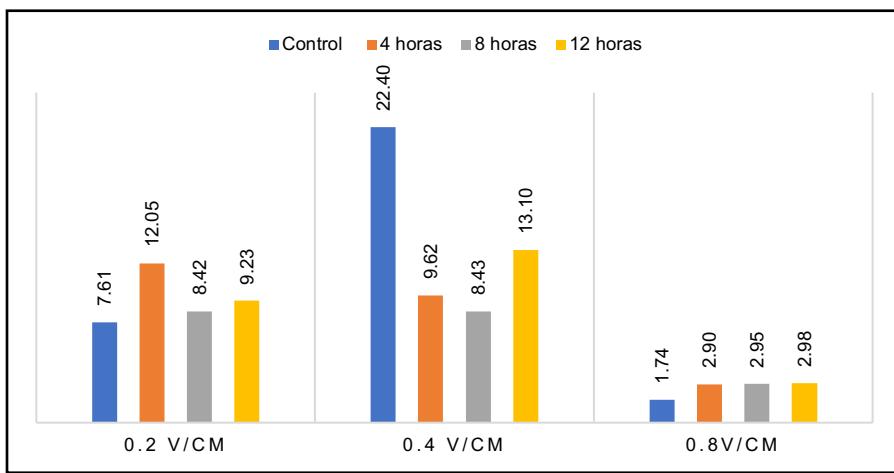


Figura 2. Plántulas de *Zea mays* doce días después de la siembra. Se muestran las plántulas de los tres tratamientos (a: 0.2 V/cm; b: 0.4 V/cm; c: 0.8 V/cm) (Elaboración propia).

La longitud promedio de las raíces mostró una respuesta variable a la estimulación eléctrica (Gráfica 2). El grupo expuesto a 0.4 V/cm durante 12 horas presentó el mayor desarrollo radicular, mientras que las raíces más cortas se observaron en el tratamiento de 0.8 V/cm, con longitudes de 1.74 a 2.98 cm. Según Delgado et al. (2008), la longitud radicular del maíz bajo labranza mínima a los 15 días post-siembra oscila entre 15 y 20 cm. Aunque las mediciones de este experimento se realizaron a los 12 días, los datos sugieren una tendencia a alcanzar ese rango en etapas posteriores. La Figura 3 muestra las diferencias morfológicas del sistema radicular, evidenciando que intensidades moderadas (0.4 V/cm) estimulan el crecimiento, mientras que intensidades altas pueden inhibirlo.



Gráfica 2. Longitud promedio de raíces de *Zea mays* doce días después de la siembra, a diferentes intensidades de campo eléctrico (0.2, 0.4 y 0.8 V/cm) y tiempos de exposición (4, 8 y 12 horas).

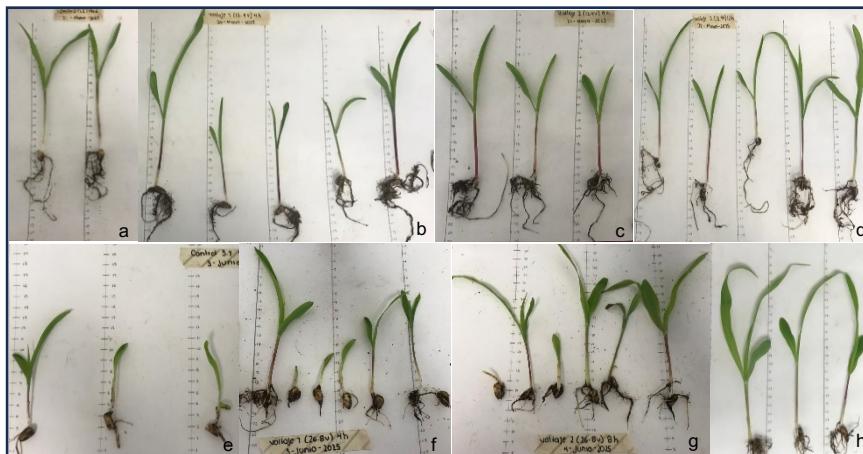
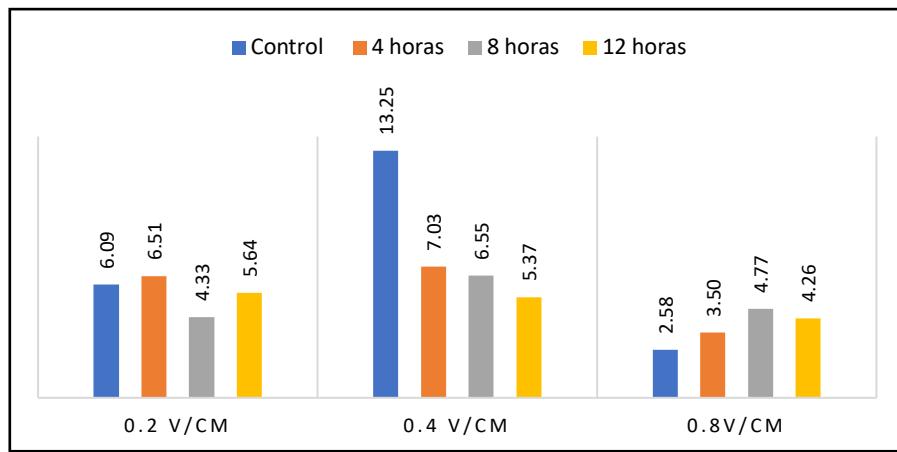


Figura 3. Sistema radicular los grupos control y expuestos a campos eléctricos (0.4 y 0.8 V/cm): a y e grupos control; b-d grupos expuestos a 0.4 V/cm a 4, 8 y 12 horas respectivamente; f-h grupos expuestos a 0.8 V/cm a 4, 8 y 12 horas respectivamente (Elaboración propia).

La longitud promedio del tallo también mostró variaciones dependientes de la intensidad del campo eléctrico (Gráfica 3). El tratamiento con 0.4 V/cm presentó los tallos más largos (promedio de 13.25 cm), mientras que 0.8 V/cm generó tallos más cortos (2.58–4.26 cm). La Figura 4 muestra la morfología de las plántulas, destacando la promoción del crecimiento a intensidades moderadas. En contraste, los valores reducidos a 0.8 V/cm podrían estar asociados a un efecto de estrés eléctrico que limita la elongación celular. Estos resultados refuerzan la idea de una relación no lineal entre la intensidad del campo eléctrico y el crecimiento de las plántulas.



Gráfica 3. Longitud promedio del tallo de *Zea mays* doce días después de la siembra, a diferentes intensidades de campo eléctrico (0.2, 0.4 y 0.8 V/cm) y tiempos de exposición (4, 8 y 12 horas).

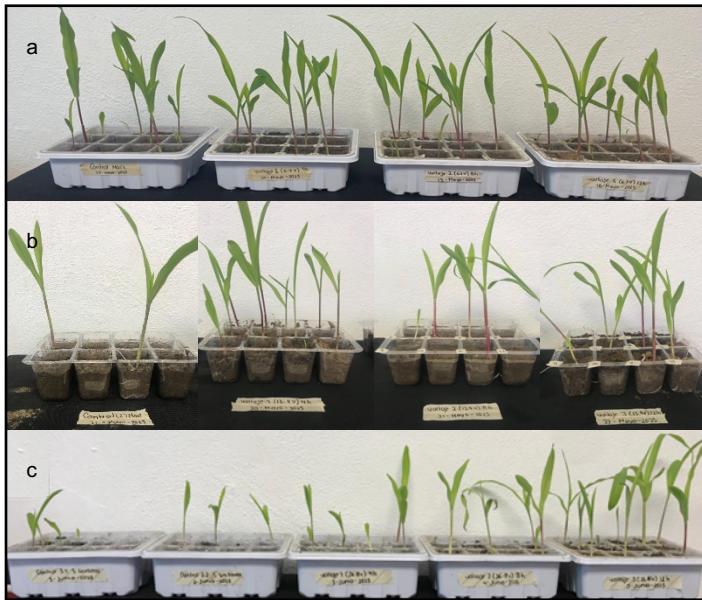
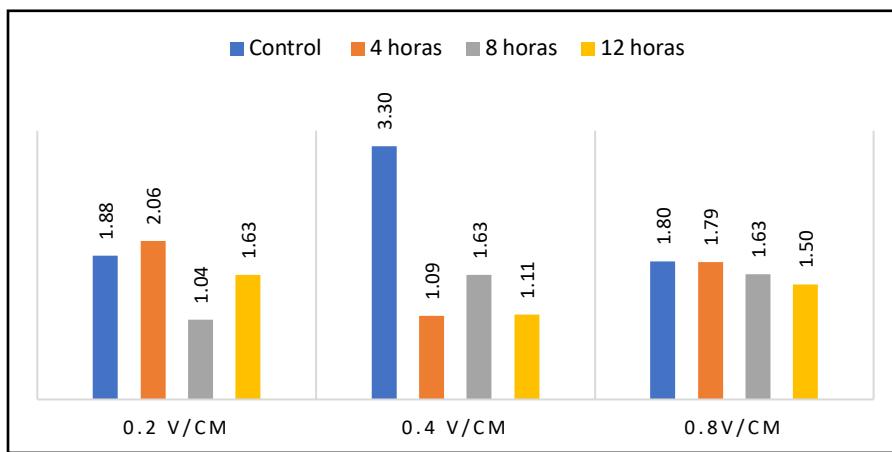


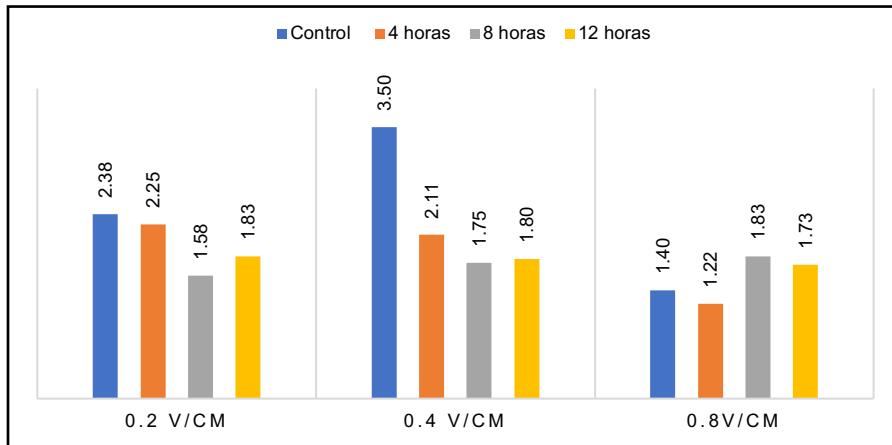
Figura 4. Plántulas de los tres tratamientos (a: 0.2 V/cm; b: 0.4 V/cm; c: 0.8 V/cm) (Elaboración propia).

El diámetro promedio del tallo, medido doce días después de la siembra, presentó un comportamiento inverso al de la longitud (Gráfica 4). El tratamiento de 0.8 V/cm mostró el mayor diámetro promedio (1.68 cm), con poca variación entre tiempos de exposición, mientras que 0.4 V/cm produjo diámetros menores (1.09–1.62 cm), excepto en el grupo control (3.3 cm). Los valores intermedios de 0.2 V/cm (1.04–2.06 cm) sugieren una respuesta compensatoria en el desarrollo estructural. Estas diferencias indican que la electroestimulación puede alterar la distribución de biomasa, afectando de forma distinta el crecimiento longitudinal y el engrosamiento del tallo.



Gráfica 4. Diámetro promedio del tallo de *Zea mays* doce días después de la siembra, a diferentes intensidades de campo eléctrico (0.2, 0.4 y 0.8 V/cm) y tiempos de exposición (4, 8 y 12 horas)

El número de hojas por plántula mostró variaciones según la intensidad del campo eléctrico (Gráfica 5). El tratamiento de 0.4 V/cm registró el mayor promedio (2.6 hojas), seguido del control (3.5 hojas). En cambio, 0.8 V/cm mostró un menor desarrollo foliar (1.5 hojas en promedio), lo que podría reflejar una inhibición en la formación de nuevos tejidos bajo estímulos intensos. De acuerdo con Zepeda et al. (2019), el número de hojas por planta puede variar con la intensidad y duración del campo aplicado, lo que concuerda con los resultados obtenidos en este estudio.



Gráfica 5. Número promedio de hojas de *Zea mays* doce días después de la siembra, a diferentes intensidades de campo eléctrico (0.2, 0.4 y 0.8 V/cm) y tiempos de exposición (4, 8 y 12 horas).

Los resultados de la cuantificación de clorofila *a*, *b* y carotenoides se resumen en la Tabla 1. Se observó una variación dependiente tanto de la intensidad como del tiempo de exposición. En 0.2 V/cm, los niveles de clorofila *a* fueron más altos a las 4 horas, mientras que a 0.4 V/cm aumentaron a las 12 horas. En 0.8 V/cm, la clorofila *a* se mantuvo en niveles más bajos. La clorofila *b* mostró un aumento notable en 0.4 V/cm a las 8 horas, consistente con Mendoza et al. (2006). Los carotenoides variaron ampliamente entre tratamientos, reflejando una interacción compleja entre intensidad eléctrica y síntesis de pigmentos.

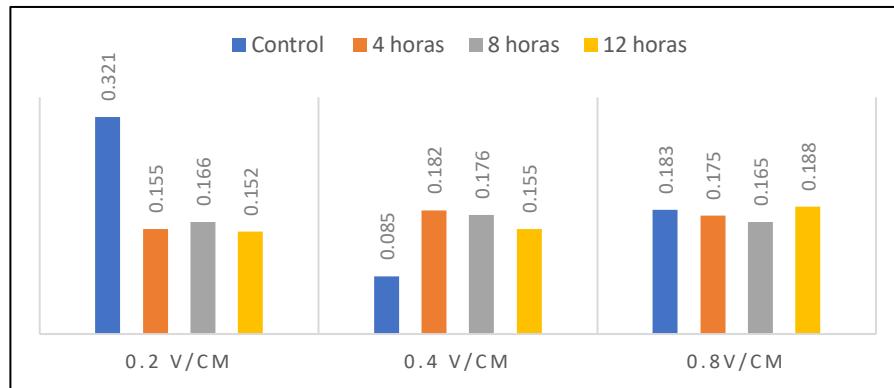
Tabla 1. Concentración de Clorofila a, Clorofila b y Carotenoides ($\mu\text{g}/\text{ml}$) (Elaboración propia).

CE (v/cm)	Parámetro	Control	4 horas	8 horas	12 horas
0.2	Clorofila A	14.1	18.7	15.4	12.7
	Clorofila B	3.9	5.6	3.9	3.0
	Carotenoides	5.5	5.5	4.5	3.6
0.4	Clorofila A	18.4	14.4	12.3	19.8
	Clorofila B	2.9	2.3	7.9	3.8
	Carotenoides	5.7	4.4	2.1	5.9
0.8	Clorofila A	9.8	12.4	12	10.2
	Clorofila B	2.4	3.4	3.3	2.6
	Carotenoides	2.8	3.6	3.5	2.9

La concentración de proteínas totales, medida con el método de Bradford (1976), se presenta en la Tabla 2. El grupo control de 0.2 V/cm mostró la mayor concentración (0.32 mg/mL). Los tratamientos eléctricos registraron valores menores (0.15–0.19 mg/mL), salvo el control de 0.4 V/cm (0.08 mg/mL), que fue comparable a los grupos estimulados. Estos resultados sugieren que la estimulación eléctrica puede alterar la síntesis o acumulación proteica, dependiendo de la intensidad aplicada. La representación gráfica (Gráfica 6) evidencia esta variabilidad

Tabla 2. Concentración de Proteínas totales (mg/ml) (Elaboración propia).

CE (v/cm)	Parámetro	Control	4 horas	8 horas	12 horas
0.2	Proteína Total	0.321	0.155	0.166	0.152
0.4	Proteína Total	0.085	0.182	0.176	0.155
0.8	Proteína Total	0.183	0.175	0.165	0.188



Gráfica 6. Concentración de proteínas totales (mg/mL) en semillas de *Zea mays* después de la exposición a las diferentes intensidades de campo eléctrico (0.2, 0.4 y 0.8 V/cm) y tiempos de estimulación (4, 8 y 12 horas).

En conjunto, los resultados indican que la electroestimulación influye de manera diferenciada en los parámetros botánicos y bioquímicos de *Zea mays*. Intensidades moderadas (0.2–0.4 V/cm) y tiempos prolongados de exposición favorecen la germinación y el crecimiento inicial, mientras que intensidades más altas (0.8 V/cm) pueden generar efectos inhibitorios o de compensación estructural. La respuesta no lineal observada respalda la hipótesis de que el electrocultivo actúa modulando procesos fisiológicos dependientes de la dosis energética aplicada.

Conclusión

Este estudio demuestra que la electroestimulación influye significativamente en la germinación y el desarrollo temprano de *Zea mays*, y que la respuesta depende de la intensidad y duración del campo eléctrico aplicado. Se observó que una baja intensidad (0.2 V/cm) durante un tiempo prolongado (12 horas) optimiza la tasa de germinación, mientras que una intensidad moderada (0.4 V/cm) favorece el crecimiento radicular y del tallo. En contraste, intensidades elevadas (0.8 V/cm) mostraron un efecto inhibitorio en la elongación, aunque con un aumento en el diámetro del tallo. Asimismo, los análisis de pigmentos y proteínas evidenciaron respuestas variables, lo que sugiere que la electroestimulación modula procesos bioquímicos relacionados con la fotosíntesis y la síntesis proteica.

A nivel práctico, los resultados confirman el potencial del electrocultivo como una técnica alternativa, accesible y de bajo costo, aplicable a huertos escolares, comunitarios o de pequeña escala, donde podría emplearse para mejorar la germinación y el crecimiento inicial de cultivos básicos como el maíz. Desde una perspectiva más amplia, la optimización de los parámetros eléctricos y la comprensión de los mecanismos fisiológicos involucrados permitirán adaptar esta tecnología a sistemas agrícolas regionales y nacionales, contribuyendo a la seguridad alimentaria y al fortalecimiento de prácticas agrícolas sostenibles en México.

Futuros estudios deberán incluir análisis estadísticos más robustos, evaluación de especies nativas y pruebas en condiciones de campo, con el fin de consolidar el electrocultivo como una herramienta eficaz para la producción agrícola sostenible y resiliente ante los desafíos del cambio climático.

Bibliografía/Referencias

1. Acosta, O. (2002). Riesgos y preocupaciones sobre los alimentos transgénicos y la salud humana. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 4(2), 5–16.
2. Acosta-Santoyo, G., & Bustos, E. (2016). Electrocultivo con importancia biológica (*Lolium perenne*) empleando electrodos de titanio. *Nthe*, 3(1-4), 2007-9079.
3. Arias Ortiz, C. F., Arteaga Vázquez, M. A., Barrera Saldaña, H. A., Galindo Fentanes, E., Gracia Gasca, A., Herrera Estrella, L. R., Higuera Ciapara, I., Larqué Saavedra, F. A., López-Munguía Canales, A., Ramírez Reivich, O. T., Revah Moiseev, S., Soberón Mainero, X., Torres Pacheco, I., Uribe de la Mora, J. M., Vázquez Ramos, J. M., & Viniegra González, G. (2017). *Transgénicos: Grandes beneficios, ausencia de daños y mitos*. CONACYT.
4. Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72, 248–254.
5. Carbonell, M. V., Martínez, E., & Amaya, J. M. (2000). Stimulation of germination in rice (*Oryza sativa L.*) by a static magnetic field. *Electro- and Magnetobiology*, 19(1), 121–128.
6. De Souza, A., Sueiro, L., García, D., & Porras, E. (2010). Extremely low frequency non-uniform magnetic fields improve tomato seed germination and early seedling growth. *Seed Science and Technology*, 38(1), 61–72.
7. Delgado, R., Castro, L., Cabrera de Bisbal, E., San Vicente, F., Mújica, M. d. J., Canache, S., Navarro, L., & Noguera, I. (2008). Evaluación de algunas características del sistema radical del maíz (híbrido inia 68) cultivado bajo labranza mínima y convencional en un suelo de Maracay, Venezuela. *Agronomía Tropical*, 58(4), 427–438. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2008000400012&lng=es&tlang=es
8. Doria, J. (2010). Generalidades sobre las semillas: Su producción, conservación y almacenamiento. *Cultivos Tropicales*, 31(1), 74–85.
9. Goldsworthy, A. (2008). Effects of electrical and electromagnetic fields on plants and related topics. In *Plant Electrophysiology, Theory and Methods* (pp. 247–265).
10. González Ulibarry, P. (2019). *Consecuencias ambientales de la aplicación de fertilizantes*. Biblioteca Nacional de Chile.
11. González-Cortés, N., Silos-Espino, H., Estrada Cabral, J. C., Chávez-Muñoz, J. A., & Tejero Jiménez, L. (2016). Características y propiedades del maíz (*Zea mays L.*) criollo cultivado en Aguascalientes, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(3), 669–680.

12. Li, Z. G., Gou, H. Q., & Li, R. Q. (2019). Electrical stimulation boosts seed germination, seedling growth, and thermotolerance improvement in maize (*Zea mays* L.). *Plant Signaling & Behavior*, 14(10), 1681101. <https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1681101>
13. Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, F4.3.1-F4: 1-8.
14. Martínez, G. (2014). *Aplicación de cargas eléctricas a semillas de maíz (Zea mays L.) y su efecto en la calidad fisiológica* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
15. Mendoza-Elos, M., Mosqueda-Villagomez, C., Rangel-Lucio, J. A., López-Benítez, A., Rodríguez-Herrera, S. A., Latournerie-Moreno, L., & Moreno-Martínez, E. (2006). Densidad de población y fertilización nitrogenada en la clorofila, materia seca y rendimiento de maíz normal y QPM. *Agricultura Técnica en México*.
16. Mroczek-Zdryska, M., Kornarzyński, K., Pietruszewski, S., & Gagoś, M. (2016). The effects of low-frequency magnetic field exposure on the growth and biochemical parameters in lupin (*Lupinus angustifolius* L.). *Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*. <https://doi.org/10.1080/11263504.2016.1186123>
17. National Geographic Society. (2025, June 20). Are Genetically Modified Crops the Answer to World Hunger? National Geographic Education. <https://education.nationalgeographic.org/resource/are-genetically-modified-crops-answer-world-hunger/>
18. Paniagua-Pardo, G., Hernández-Aguilar, C., Rico-Martínez, F., Domínguez-Pacheco, F. A., Martínez-Ortiz, E., & Martínez-González, C. L. (2015). Efecto de la luz led de alta intensidad sobre la germinación y el crecimiento de plántulas de brócoli (*Brassica oleracea* L.). *Polibotánica*, (40), 199–212. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682015000200013&lng=es&tlng=es
19. Pita Villamil, J. M., & Pérez Garza, F. (2019). *Germinación de semillas*. Hojas divulgadoras, 2090.
20. Plancarte Martínez, M. R., Durán Moreno, L. M., Gálvez Ruiz, J. C., Ochoa Meza, A., & Pacheco Ayala, F. (2014). *El cultivo del maíz, generalidades y sistemas de producción en el noreste* (Tesis doctoral). Universidad de Sonora.
21. Ries, A., Benítez, J. V., Samudio, A., Armoa, R., & Nakayama, H. D. (2023). Germination of bean seeds (*Vigna unguiculata* L. Walp.) in strong electric fields. *MethodsX*, 10, 102490. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102490>
22. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2023, March 10). *Maíz, cultivo de México*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-cultivo-de-mexico> (Consultado el 20 de junio de 2025)
23. Secretaría de Salud. (2024, July 4). *Alimentación saludable*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/salud/articulos/alimentacion-saludable#:~:text=El%20ma%C3%ADz%20es%20clave%20en> (Consultado el 20 de junio de 2025).
24. Zepeda Bautista, R., Virgen Vargas, J., Suazo-López, F., Domínguez-Pacheco, F. A., Rodríguez-Rebollar, H., & Hernández-Aguilar, C. (2019). Campo electromagnético en plántulas, rendimiento y calidad de maíz en condiciones de campo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(3), 629–642. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1561>