

Influencia de la Estimulación mediante Campos Eléctricos en la germinación de semillas de maíz (*Zea mays*): Estudio Experimental

Influence of electric field stimulation on seed germination of maize (*Zea Mays*): Experimental study

Karla Itzel Ramírez Ramírez, Yunuen Salazar Vargas, Andrea Guadalupe Caudillo Rodríguez, Ana Lizbeth Arredondo Hernández, Regina Fernández Cabrera, Luis Ángel Rodríguez Montelongo, 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.mx¹

Resumen

En este estudio, se analizó el efecto de campos eléctricos en la germinación de semillas de maíz (*Zea mays*) con el propósito de identificar la intensidad óptima que favorezca la germinación y el crecimiento temprano de las plantas sin afectar los procesos celulares esenciales. Se implementó un sistema de electrocultivo utilizando alambre de cobre para generar campos eléctricos de baja intensidad en rangos de 0.4, 0.5, 0.8, 1.0 y 1.2 V/cm. Los resultados mostraron que el campo eléctrico impacta en la germinación, el desarrollo del sistema radicular, el área foliar y el grosor del coleoptilo en las plantas de maíz. Estas variaciones observadas resaltan la relevancia de considerar la influencia de la estimulación eléctrica en diferentes etapas del crecimiento vegetal. En conclusión, este estudio proporciona información valiosa sobre el potencial impacto de la estimulación eléctrica en el desarrollo de las plantas, ofreciendo nuevas perspectivas sobre cómo esta técnica puede mejorar diversos aspectos del crecimiento vegetal de manera controlada y efectiva.

Palabras clave: Electrocultivo, energía eléctrica, semillas, plántulas.

Introducción

El rápido crecimiento de la población mundial en los últimos años ha incrementado las demandas básicas de alimentación, necesitando así un aumento significativo en la producción de alimentos. Esta necesidad se posiciona como uno de los mayores desafíos del siglo XXI. Con una proyección de la población mundial que alcanzaría los 10,000 millones para el año 2050, según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), la urgencia de incrementar la producción de alimentos en un 60% plantea interrogantes críticas sobre la sostenibilidad, la seguridad alimentaria y el impacto ambiental asociado. Este aumento en la producción debe lograrse sin comprometer la sustentabilidad y la salud ambiental. La agricultura moderna se enfrenta al desafío de producir más alimentos de manera eficiente y con un impacto mínimo en la población y el entorno. Este desafío requiere la aplicación de tecnologías verdes y sostenibles que mejoren los procesos agrícolas. La agricultura desempeña un papel fundamental en la sociedad, al posibilitar la producción de alimentos esenciales para la supervivencia humana. Para mejorar la producción y reducir los riesgos asociados con el proceso agrícola, es crucial estudiar los factores que influyen durante la siembra, el crecimiento de las plantas y que impactan negativamente en la productividad de los cultivos, tales como la alta salinidad del suelo, la escasez de agua, variaciones extremas de temperatura ambiental, entre otros. Mantenerse a la vanguardia de las herramientas tecnológicas es esencial para el progreso del sector agrícola (Santos, 2018)

La agricultura ha experimentado una mejora continua que ha impulsado su desarrollo a lo largo del tiempo. En la actualidad, se ha alcanzado un nivel de intensidad y eficiencia en términos productivos y económicos que es extraordinario y sin precedentes (Sandía et al., 1998). En este contexto, una alternativa prometedora en el ámbito agrícola es el electrocultivo, también conocido como electrocultura, cuyo término proviene del francés "culture". Esta innovadora técnica consiste en fertilizar los cultivos utilizando electricidad atmosférica y el campo magnético terrestre. El electrocultivo tiene como objetivo primordial potenciar la producción de

la tierra, incrementar significativamente los rendimientos y reducir la necesidad de mano de obra agrícola, todo ello sin recurrir al uso de productos químicos. Según Jim Lee, inventor del electrocultivo en Estados Unidos, su funcionamiento se basa en la mayor facilidad con la que las plantas absorben las moléculas de dióxido de carbono cargadas negativamente durante la fotosíntesis. Este proceso potencia la conversión de la luz en energía química por parte del sistema biológico de la planta, conocido como proceso de separación de carga fotoinducida, y facilita el transporte de electrones a través de una cadena de transporte de electrones dentro del organismo vegetal. Los resultados se reflejan en un crecimiento acelerado, una mayor producción de plantas o frutas, y una vida más saludable. Los iones atmosféricos contribuyen como complemento en la fotosíntesis, la respiración de la planta y la absorción de agua y minerales en el suelo, mientras que la presencia de iones de alto voltaje ayuda a reducir la infestación de herbívoros no deseados (Sellanes, 2023). En el año 1900, el gobierno chino inició la financiación de investigaciones sobre electrocultivo. En el año 2019, se registraron 3600 hectáreas de invernaderos utilizando la electrocultura en China. Según el informe de la Academia China de Ciencias Agrícolas (CAAS) de ese mismo año, se observó un incremento del 30% en los rendimientos de los cultivos al implementar esta tecnología. En tan solo dos años, las verduras tratadas con impulsos eléctricos generaron ingresos adicionales de casi 1.2 millones de yuanes (equivalente a US \$ 175,000) (Gurovich, 2012; Goldsworthy, 2008).

La estimulación eléctrica exógena es una técnica eficiente y respetuosa con el medio ambiente que regula el crecimiento y desarrollo de las plantas mediante la interacción con sistemas hidráulicos, químicos como el Ca^{2+} y especies reactivas de oxígeno, así como la señalización hormonal a través de ácido abscísico y ácido jasmónico, entre otros. Varios estudios han demostrado tanto efectos positivos como negativos de la estimulación eléctrica en aspectos como la germinación de semillas, el rendimiento de los cultivos y la calidad de los frutos. Esta técnica puede influir de manera positiva en el metabolismo celular, la señalización hormonal y la tolerancia de las plántulas al estrés por salinidad. No obstante, la efectividad de la estimulación eléctrica puede variar y depender de la especie vegetal y las condiciones específicas de aplicación (Sellanes, 2023; Li et al., 2019). Estudios previos han demostrado que la estimulación eléctrica y el uso de agua magnetizada pueden mejorar significativamente la germinación y el crecimiento de semillas. En la investigación de Li et al. (2019), se aplicaron estímulos eléctricos de 22V durante 15 minutos en semillas de maíz, lo que resultó en un aumento en la tasa de germinación y el crecimiento de las plántulas. Las plántulas tratadas con estimulación eléctrica también demostraron una mayor tolerancia al calor, presentando menos daños y una mejor supervivencia tras la exposición a altas temperaturas. Los autores sugieren que la estimulación eléctrica puede activar vías de señalización celular que mejoran la expresión de genes relacionados con la germinación y la tolerancia al estrés por altas temperaturas. Por otro lado, en el estudio de Mahmood & Usman (2014), se evaluó el efecto del agua magnetizada en semillas de maíz, mostrando un incremento del 60% en el índice de emergencia (EI), un 26% en el índice de tasa de emergencia (ERI) y una reducción del 17.9% en el tiempo medio de emergencia (MET). Los autores sugieren que este tratamiento podría mejorar la movilización y transporte de nutrientes al eje embrionario de las semillas.

El maíz ocupa el puesto de cultivo más significativo en México, siendo un cereal nutricionalmente rico y una parte esencial de la dieta diaria de la población mexicana. La diversidad de variedades de maíz en el país es amplia, con la presencia de 60 razas distintas. En México, se cultiva tanto maíz blanco como amarillo en aproximadamente siete millones de hectáreas, lo que resulta en una producción anual que supera los 18 millones de toneladas (Alegria-Marroquín et al., 2020). Los principales estados productores incluyen Sinaloa, Jalisco, Guanajuato y Michoacán. La importancia del maíz en México se refleja en su historia, arte, recetas y, especialmente, desde una perspectiva alimentaria, industrial y social. Con un consumo promedio per cápita anual de 196.4 kg de maíz blanco, este cultivo representa el 14.47% del Producto Interno Bruto (PIB) agrícola nacional y el 84.43% de la producción total de cereales (SAGARPA, 2017). La producción de maíz se adapta a una variedad de entornos de cultivo, teniendo en consideración factores como altitud, temperatura, humedad, tipos de suelo y tecnologías agrícolas empleadas (Arista et al., 2012). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es analizar la viabilidad de aplicar el electrocultivo en los cultivos de maíz.

Metodología

Para el desarrollo del electrocultivo, se implementó la siguiente metodología:

- a) **Selección Semillas:** Las semillas de maíz (*Zea mays*) se obtuvieron de un proveedor comercial y se mantuvieron a temperatura ambiente protegidas de la luz directa hasta su uso. Para la experimentación, las semillas se seleccionaron considerando criterios como tamaño y grosor, asegurando la integridad sin daños físicos notables, como roturas o deformaciones. Una vez seleccionadas las semillas, se

lavaron para desinfectarlas y prevenir plagas durante el experimento. Para ello, se esterilizaron con una solución de hipoclorito sódico al 5% durante 15 minutos, seguido de un enjuague con agua destilada.

- b) **Diseño del Sistema de Estimulación:** Para los experimentos de electrocultivo, se utilizó corriente directa (CD) con una fuente de alimentación capaz de regular el voltaje y la corriente a baja intensidad. Se aplicaron campos eléctricos de 0.4, 0.5, 0.8, 1.0 y 1.2 V/cm en cada prueba experimental. Se cortaron 22 bases de madera de 5x5 cm, equipadas con cinco clavos pequeños para conectar los caimanes y permitir el paso de electricidad desde la fuente de alimentación. Estas bases se colocaron en recipientes de plástico de 18x27 cm, cada uno con 1000 g de suelo seco y tamizado (*Figura 1*). Posteriormente, el suelo se humedeció hasta una saturación de 40% de humedad. El pH y la conductividad eléctrica del suelo fueron de 5.3 y 474 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Para promover el óptimo crecimiento de las plántulas de maíz, se bloqueó la entrada de luz natural y se usó iluminación artificial exclusivamente a través de lámparas para simular un ciclo de iluminación natural. Se realizó una limpieza minuciosa del área experimental para mantener un entorno ordenado y controlado. Además, al inicio del experimento se incluyó un grupo control que consistía en semillas sin exposición al campo eléctrico exógeno.

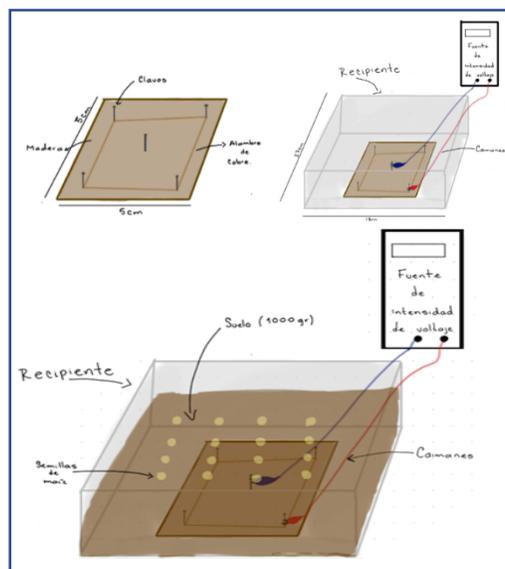
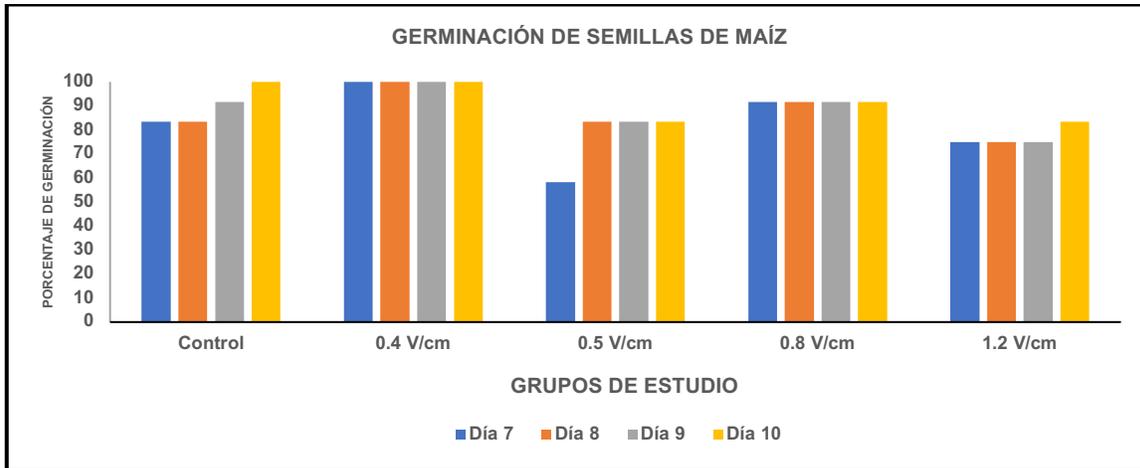


Figura 1. Sistema de estimulación eléctrica. (Elaboración propia, 2024)

- c) **Aplicación de la Estimulación:** las semillas se colocaron en el suelo a una profundidad de 2.5cm en filas de 4 y entre cada semilla se conservó un espacio de 2cm. Previo a la estimulación eléctrica, las semillas fueron sometidas a un proceso de adaptación de 24 horas a una temperatura de 25°C. Posteriormente, se procedió a la conexión de los electrodos a una fuente de alimentación para suministrar la energía necesaria a fin de generar los campos eléctricos establecidos previamente. Cada tratamiento eléctrico tuvo una duración de 4 horas. Tras la aplicación de dichos tratamientos, los cultivos se mantuvieron siguiendo un régimen de fotoperiodo de 8 horas de luz artificial y 16 horas de oscuridad. A lo largo de todo el experimento, se mantuvo una temperatura constante entre 25 y 28°C para asegurar las condiciones óptimas de germinación de las semillas de maíz.
- d) **Evaluación de los Resultados:** Para investigar los efectos de los campos eléctricos en los procesos de germinación de semillas y emergencia de plántulas, se analizaron varios parámetros clave. Se evaluó el porcentaje de germinación para comparar la eficacia de la germinación bajo la influencia de los campos eléctricos con el grupo de control. Además, se examinó el desarrollo del sistema radicular en términos de longitud y ramificación, el crecimiento del área foliar para comprender la influencia en la fotosíntesis, y el desarrollo del hipocótilo para observar posibles cambios en la estructura de las plántulas. Asimismo, se midió el contenido de clorofila como indicador de la salud y la eficiencia fotosintética de las plantas con la técnica de de Lichtenthaler & Buschmann (2001).

Resultados y discusión

Después de 12 días de cultivo, se procedió a la extracción de las plántulas de maíz y se inició el análisis con la evaluación de la germinación de las semillas. Se observó que las semillas expuestas a un campo eléctrico de 0.4 V/cm alcanzaron una tasa de germinación del 100% en el séptimo día. En contraste, las semillas del grupo control, que no estuvieron expuestas al campo eléctrico, alcanzaron el 100% de germinación en el décimo día. Sin embargo, las semillas de los grupos expuestos a campos eléctricos de 0.5, 0.8 y 1.2 V/cm solo lograron un porcentaje de germinación cercano al 80% (Gráfica 1). Por lo tanto, el campo eléctrico con intensidad de 0.4 V/cm favorece el proceso de germinación.



Gráfica 1. Porcentaje de germinación de semillas de maíz en los grupos control y expuestos a campos eléctricos con intensidades de 0.4, 0.5, 0.8 y 1.2 V/cm durante un periodo de cultivo de 10 días. (Elaboración propia, 2024)

Se monitoreó de forma constante el crecimiento de las plántulas de maíz, evidenciando cambios significativos y distintivos en respuesta a los diversos niveles de campo eléctrico aplicados (0.4, 0.5, 0.8, 1.0 y 1.2 V/cm). Las imágenes de los cultivos de las semillas de maíz en los días 7 y 9 del experimento, presentadas en la Figura 2, muestran claramente la variación en el número de plántulas en los diferentes grupos estudiados, lo que refleja de manera notoria los efectos positivos de la estimulación eléctrica en el crecimiento de los cultivos.

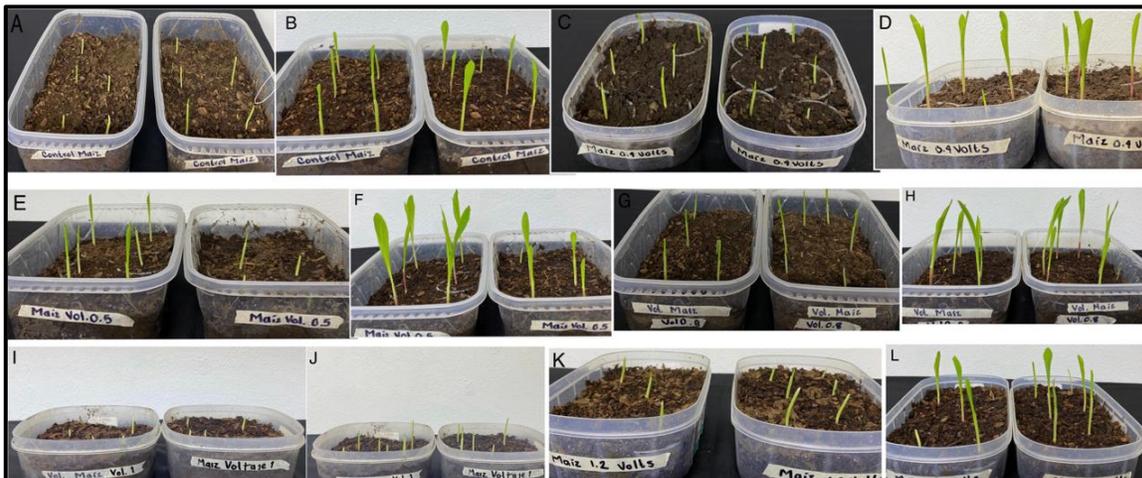
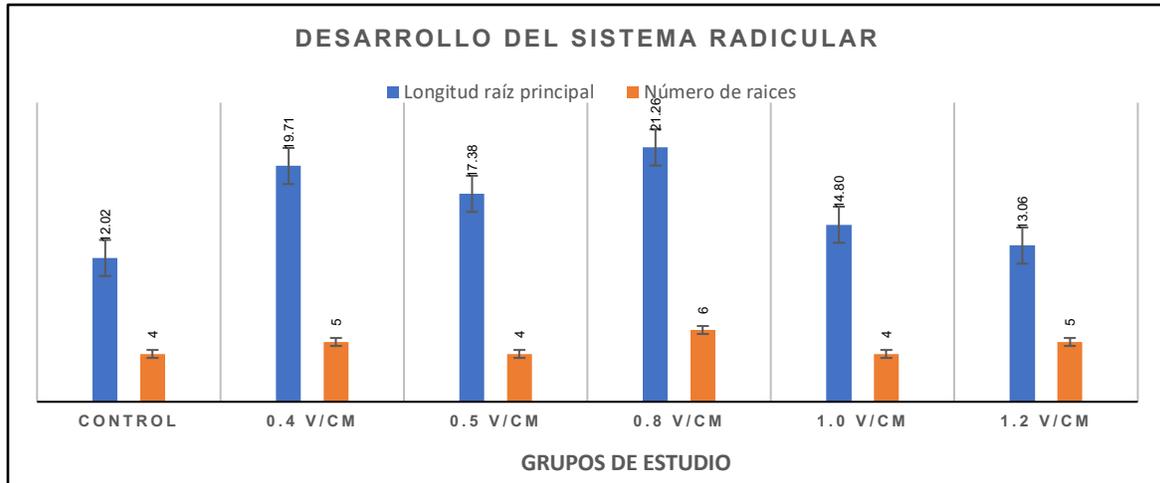


Figura 2. Plántulas de maíz en los grupos control (A, B) y expuestas a campos eléctricos 0.4V/cm (C, D), 0.5V/cm (E, F), 0.8 V/cm (G, H), 1.0V/cm (I, J) y 1.2 V/cm (K, L) durante un periodo de cultivo de 12 días.

En cuanto al desarrollo del sistema radicular en los diferentes tratamientos, se pudo observar que el grupo de semillas expuestas a un campo eléctrico de 0.8 V/cm mostró una raíz principal de 21.26 cm de longitud, mientras que el grupo control tuvo una longitud promedio de raíz de 12.02 cm. Por otro lado, los tratamientos con intensidades de campo eléctrico de 0.4, 0.5, 1.0 y 1.2 V/cm exhibieron longitudes de raíz de 19.71 cm, 17.38 cm, 14.80 cm y 13.06 cm, respectivamente. Estos hallazgos reflejan un impacto positivo en el desarrollo de la raíz principal debido a la exposición al campo eléctrico, ya que todas las muestras presentaron longitudes de raíz superiores a las del grupo control. En cuanto al número de raíces secundarias, se observó que el grupo expuesto al campo eléctrico de 0.8 V/cm presentó un mayor número de raíces, respecto a los otros grupos de estudio, incluyendo al grupo control (Gráfica 2). Este resultado evidencia la influencia del campo eléctrico de 0.8 y 0.4 V/cm en el desarrollo del sistema radicular.



Gráfica 2. Desarrollo del sistema radicular de las semillas de maíz en los grupos control y expuestas a campos eléctricos con intensidades de 0.4, 0.5, 0.8, 1.0 y 1.2 V/cm durante un periodo de cultivo de 12 días. (Elaboración propia, 2024)

En la figura 3, se muestra el sistema radicular de las plántulas originadas de las semillas que germinaron en el grupo de control y en los grupos expuestos a campos eléctricos. A través de representaciones gráficas, se evidencian las diferencias en longitud, ramificación y desarrollo del sistema radicular entre los diversos grupos. Este enfoque visual permite una observación minuciosa de cómo la estimulación eléctrica afecta el sistema radicular de las plantas en contraste con el grupo de control.

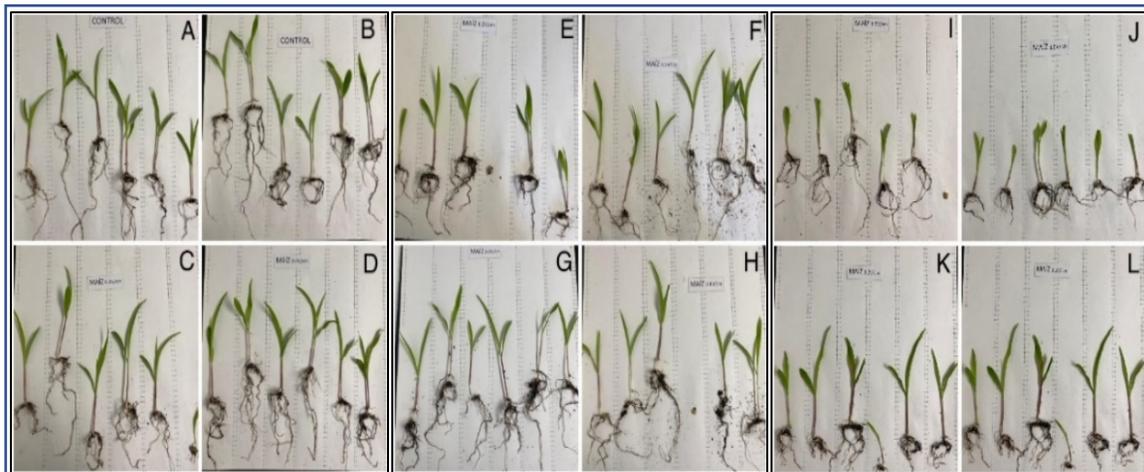
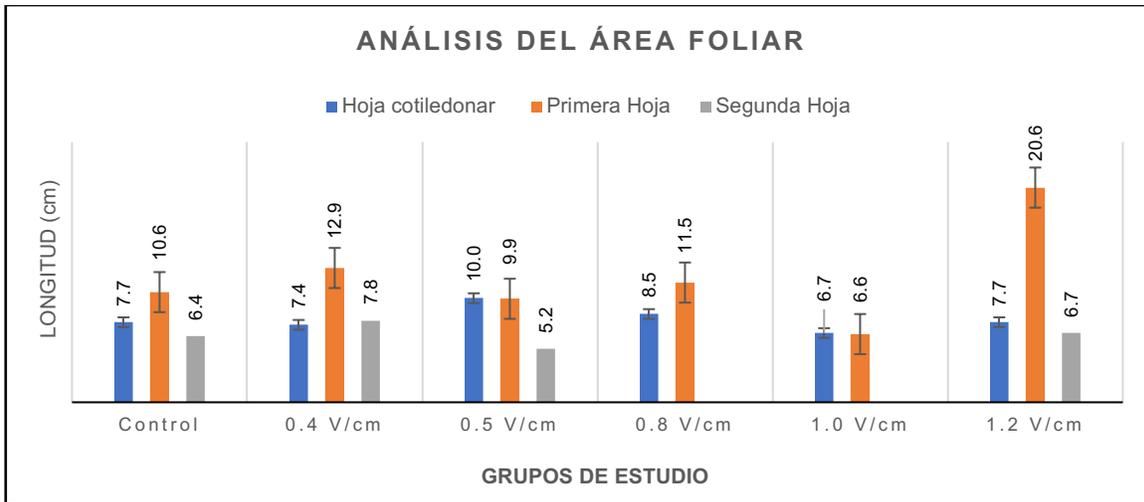


Figura 3. Sistema radicular de las plántulas de maíz en los grupos control (A, B) y expuestas a campos eléctricos 0.4V/cm (C, D), 0.5V/cm (E, F), 0.8 V/cm (G, H), 1.0V/cm (I, J) y 1.2 V/cm (K, L)

En relación con el desarrollo del área foliar de las plantas en los diferentes tratamientos, se observó que los grupos de semillas expuestas a los campos eléctricos de 0.8 y 1.0 V/cm, a los doce días de cultivo, no mostraron el desarrollo de la segunda hoja. Por otro lado, tanto en el grupo control como en los grupos expuestos a los campos eléctricos de 0.4, 0.5 y 1.2 V/cm, se observó el desarrollo de la hoja cotiledonar, así como de la primera y segunda hoja. Es interesante destacar que la primera hoja mostró un mayor crecimiento en los grupos de plantas expuestas a los campos eléctricos de 0.4, 0.8 y 1.2 V/cm en comparación con el grupo control (*Gráfica 3*). Estos hallazgos sugieren que no se evidencia un efecto negativo en el desarrollo del área foliar cuando las semillas son expuestas a campos eléctricos. En este análisis es evidente que la intensidad de campo de 1.2 V/cm impacta en el desarrollo del área foliar.



Gráfica 3. Desarrollo del área foliar de las plántulas de maíz en los grupos de control y expuestas a campos eléctricos con intensidades de 0.4, 0.5, 0.8, 1.0 y 1.2 v/cm durante un periodo de cultivo de 12 días. (Elaboración propia, 2024)

En la *Figura 4*, se observan los diferentes grupos de estudio, que incluyen un grupo de control y cuatro grupos expuestos a diversas intensidades de campo eléctrico (0.4, 0.5, 0.8 y 1.2 V/cm). Es relevante destacar que en cada grupo se evidenció un cambio significativo en el desarrollo foliar de cada plántula, lo que resalta la importancia de la exposición a las distintas intensidades de campo eléctrico en su crecimiento. La imagen proporciona una clara comparación visual de los efectos de la estimulación eléctrica en el desarrollo de la plántula en contraste con el sistema de control.

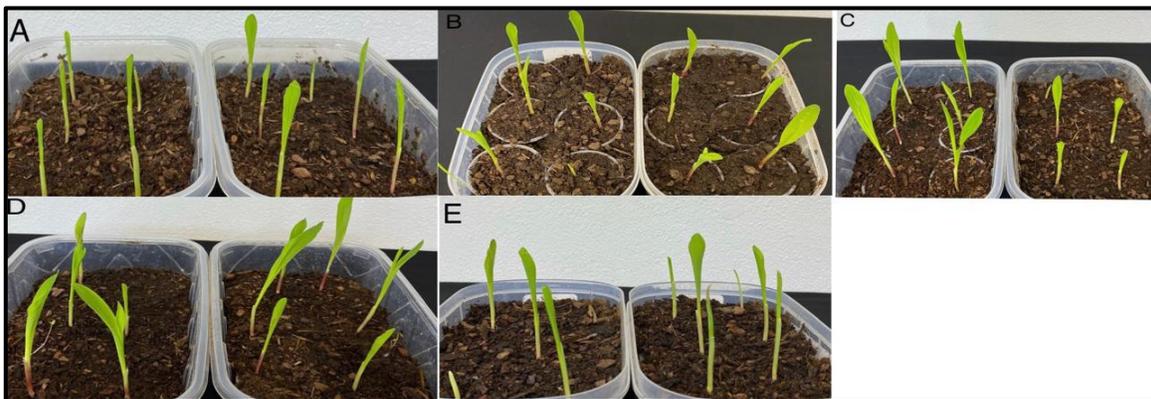
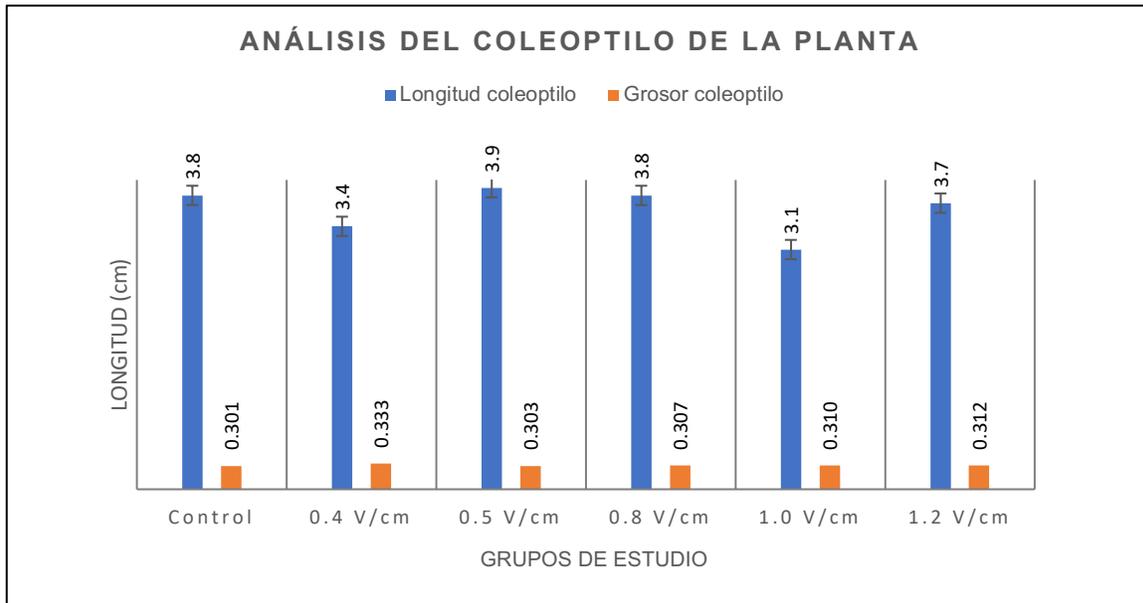


Figura 4. Análisis de área foliar de las plántulas de maíz en los grupos control (A) y expuestas a campos eléctricos 0.4V/cm (B), 0.5V/cm (C), 0.8 V/cm (D) y 1.2 V/cm (E) durante un periodo de cultivo de 12 días. (Elaboración propia, 2024)

En el análisis del coleoptilo de las plántulas de maíz, se observa que la longitud es bastante similar en los grupos de control y aquellos estimulados con 0.5, 0.8 y 1.2 V/cm, con medidas de 3.8 cm, 3.9 cm, 3.8 cm y 3.7 cm respectivamente. Sin embargo, en los grupos estimulados con intensidades de campo de 0.4 y 1.0 V/cm, la longitud es menor. En cuanto al grosor, se aprecia un ligero aumento en los grupos estimulados en comparación con el grupo de control. Estos hallazgos revelan efectos positivos en el desarrollo del coleoptilo de las plantas de maíz (Gráfica 4).



Gráfica 4. Análisis del coleoptilo de las plántulas de maíz en los grupos de control y expuestos a campos eléctricos con intensidades de 0.4, 0.5, 0.8, 1.0 y 1.2 v/cm. (Elaboración propia, 2024)

En la *Figura 5*, se muestra el proceso de medición de las plántulas de maíz. Se destaca el instrumental principal utilizado en esta investigación para medir la longitud del coleoptilo de las plántulas, así como su grosor; para estas mediciones se empleó un micrómetro o calibrador de grosores. Para una medición precisa y detallada de estos parámetros morfológicos, se utilizó un enfoque meticuloso y un instrumento de alta precisión.

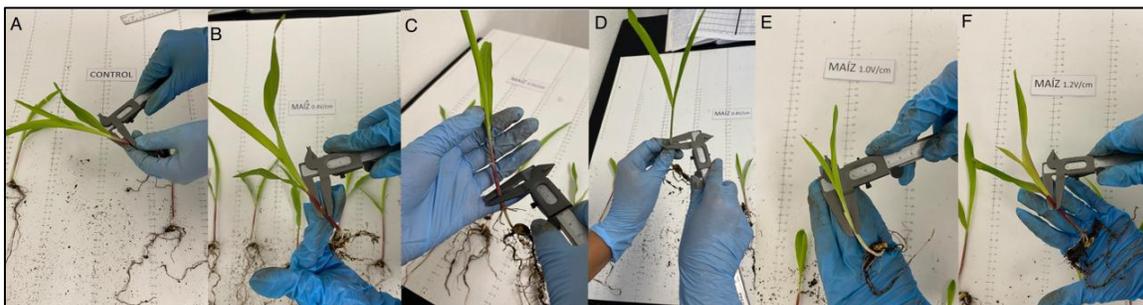


Figura 5. Mediciones de los coleoptilos de las plántulas de maíz en los grupos A) Control, B) 0.4 V/cm, C) 0.5V/cm, D) 0.8V/cm, E) 1.0 V/cm y F)1.2 v/cm.

Respecto a la medición del contenido de pigmentos de asimilación en las hojas de las plántulas de maíz, clorofila a (chl a), clorofila b (chl b), y clorofila total (chl a + b) se realizó el día 12 del experimento. El contenido de pigmentos en las hojas del grupo control fue de 6.25 mg/g (chl a), 9.25 mg/g (chl b), y 8.21 mg/g (chl a + b) (Tabla 1). Tras la exposición a las intensidades de campo de 0.4 y 1.2 V/cm, el contenido de clorofila a incrementó un 65% y un 7%, y el contenido de clorofila a+b también incrementó un 61% y un 1%, respectivamente, en comparación con el control. Sin embargo, se registró una disminución del 7% en el contenido de clorofila b en el grupo estimulado con 0.4V/cm, mientras que en el grupo estimulado con 1.2V/cm se observó un aumento del 7%. Además, se detectaron modificaciones en el contenido de clorofila en los demás tratamientos. Los valores normales de clorofila en plantas de maíz pueden variar dependiendo de factores como la edad de la planta, las condiciones de crecimiento, la variedad de maíz, entre otros. Estos valores pueden servir como referencia para evaluar la salud y el rendimiento de las plantas de maíz. Es evidente que la asimilación de pigmentos en las hojas de las plántulas también se ve afectada, positiva o negativamente, por la estimulación eléctrica.

Tabla 1. Contenido de clorofila en hojas de plántulas de maíz (*Zea mays*).

Clorofila (mg/g)	Control	0.4V/cm	0.5V/cm	0.8V/cm	1.0V/cm	1.2V/cm
Clorofila a	6.25	10.31	2.93	3.86	6.29	6.67
Clorofila b	9.25	8.62	10.9	10.43	9.63	9.93
Clorofila a+b	8.21	13.21	3.96	4.96	7.68	8.28

Los resultados obtenidos en este estudio revelan que la aplicación de un campo eléctrico de 0.4 V/cm aceleró significativamente la germinación de las semillas de maíz, logrando una tasa del 100% en tan solo 7 días, en contraste con los 10 días requeridos por el grupo control. Este hallazgo sugiere que la estimulación eléctrica de baja intensidad puede ser una estrategia efectiva para acelerar el proceso de germinación. Por otro lado, se observó que los campos eléctricos de mayor intensidad (0.5, 0.8 y 1.2 V/cm) no lograron alcanzar una tasa de germinación tan alta, llegando solo alrededor del 80%. En cuanto a la longitud del coleóptilo, se encontraron medidas similares entre el grupo control y los grupos expuestos a campos eléctricos de 0.5, 0.8 y 1.2 V/cm, con valores cercanos a los 3.8 cm. Las longitudes más cortas se registraron en los grupos de 0.4 y 1.0 V/cm, indicando que estas intensidades podrían no ser óptimas para el crecimiento del coleóptilo. Sin embargo, el incremento en el grosor en los grupos estimulados sugiere un desarrollo estructural más robusto, reflejando una mayor resistencia y vigor en las plántulas.

El análisis del desarrollo radicular reveló que la exposición a un campo eléctrico de 0.8 V/cm promovió raíces principales más largas, con una longitud promedio de 21.26 cm, superando significativamente al grupo control, que presentó una longitud promedio de 12.02 cm. Este resultado sugiere que la intensidad de 0.8 V/cm es particularmente efectiva para estimular el crecimiento radicular. Además, se observó un mayor número de raíces secundarias en este grupo, indicando un sistema radicular más saludable. Estos hallazgos respaldan investigaciones previas que sugieren que la estimulación eléctrica puede mejorar el desarrollo radicular, lo que podría resultar en una mejor absorción de agua y nutrientes por parte de las plántulas. En relación al desarrollo foliar, se observó una variabilidad interesante. Los grupos expuestos a campos eléctricos de 0.8 y 1.0 V/cm no desarrollaron la segunda hoja después de 12 días, a diferencia del grupo control y los demás grupos. Sin embargo, la primera hoja mostró un mayor crecimiento en los grupos expuestos a 0.4, 0.8 y 1.2 V/cm. Esto sugiere que la estimulación eléctrica puede tener un efecto diferencial en las distintas etapas del desarrollo foliar. La ausencia de efectos negativos en el desarrollo de la segunda hoja en los grupos tratados sugiere que, aunque la estimulación eléctrica puede influir en ciertas etapas, los niveles de estimulación eléctrica pueden ser beneficiosos sin comprometer la salud general de las plántulas.

Los resultados obtenidos respecto a la medición del contenido de clorofila revelan que la exposición a campos eléctricos de 0.4 y 1.2 V/cm tiene un impacto significativo en la cantidad de clorofila a y total (chl a + b). El notable aumento en el contenido de clorofila a y clorofila total en el grupo expuesto a 0.4 V/cm sugiere que la estimulación eléctrica podría favorecer una mejor absorción de nutrientes, en especial nitrógeno, lo que mejora la capacidad fotosintética de las plántulas. Investigaciones han demostrado que la disponibilidad de nitrógeno se relaciona con niveles óptimos de clorofila, vinculados a un crecimiento

vegetativo vigoroso (Mendoza-Elos et al., 2006). Por otro lado, la menor respuesta en la clorofila b y el efecto menos marcado a 1.2 V/cm podrían indicar que intensidades más altas de estimulación eléctrica afectan de manera diferencial los diversos tipos de clorofila o alteran el equilibrio de nutrientes en las plantas. En situaciones de deficiencia de nitrógeno, la concentración y función de la clorofila se ven afectadas, así como la eficiencia en la captación de luz solar para la fotosíntesis (López, 1990). Aunque se observó un aumento en la clorofila b a 1.2 V/cm, este incremento fue menor en comparación con el grupo de 0.4 V/cm, lo que podría indicar una adaptación en la síntesis de clorofila en distintas condiciones de estimulación. Estos efectos podrían estar relacionados con la capacidad de las plantas para adaptarse a diversas condiciones de estimulación eléctrica.

En resumen, los resultados de este estudio indican que la exposición a campos eléctricos de baja intensidad (0.4 y 0.8 V/cm) no solo acelera la germinación, sino que también mejora significativamente el desarrollo del sistema radicular y foliar en comparación con el grupo control. Estos hallazgos coinciden con investigaciones anteriores, como la de Li et al. (2019), que demostró que la estimulación eléctrica activa vías de señalización celular, mejorando la germinación y el crecimiento de plántulas de maíz. Asimismo, en el estudio de Florez et al. (2007) se demostró que la exposición a campos eléctricos y magnéticos aumenta la longitud de las raíces y el rendimiento en diversas plantas, incluidas las de maíz.

Conclusión

Los resultados de la investigación destacan la viabilidad del electrocultivo para mejorar el crecimiento y la productividad de los cultivos de maíz. Los campos eléctricos aplicados a diferentes intensidades han demostrado efectos positivos en el desarrollo radicular y foliar de las plántulas de maíz. La estimulación eléctrica ha contribuido significativamente a mejorar la tasa de germinación, especialmente a intensidades más bajas como 0.4 y 0.8 V/cm, mostrando un potencial de mejora en la germinación, desarrollo radicular y foliar de las semillas de maíz. Estos resultados sugieren que la aplicación de campos eléctricos de baja intensidad podría ser una estrategia viable para aumentar la eficiencia y productividad agrícola. Además, el uso del electrocultivo podría reducir la dependencia de fertilizantes y pesticidas químicos, lo que a su vez podría disminuir la contaminación del suelo, agua y aire. No obstante, es crucial considerar los efectos específicos de cada intensidad y las condiciones ambientales para optimizar el uso de esta tecnología en la agricultura.

Bibliografía/Referencias

1. Alegría-Marroquín, J., Castillo-Ruíz, O., & Saldaña-Trinidad, S. (2020). Caracterización fisicoquímica de maíz (*Zea mays* L.) pigmentado para potenciar su consumo. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 5: 272–276.
2. Arista, J., y González, A. (2012). El potencial de mercado de semillas mejoradas de maíz en México. B. J. D. Etchevers, "Useful Techniques of Diagnosis in the Measurement of the Soil Fertility and the Nutrient Status of Crops," *Terra Latinoam*. vol. 17 (3): 209–219.
3. Florez, M., Carbonell, M., & Martinez, E. (2007). Exposure of maize seeds to stationary Magnetic fields: Effects on germination and early growth. *Environmental and Experimental Botany*, 59(1): 68–75.
4. Goldworthy, A. (2008). Effects of Electrical and Electromagnetic Fields on Plants and Related Topics. In *Plant Electrophysiology, Theory and Methods*. Pp: 247-265.
5. Gurovich, L. A., (2012) Electrophysiology of woody plants. In book: *Electrophysiology – From plants to heart*.
6. 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 and Behavior*, 14(12). <https://doi.org/10.1080/15592324.2019.1681101>
7. Lichtenthaler HK, Buschmann C. 2001. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, F4.3.1-F4: 1-8.
8. López B., L. 1990. Cultivos herbáceos. Volumen I: Cereales. Mundi–Prensa. Madrid, España. 539 p.
9. Mahmood, S., & Usman, M. (2014). Consequences of Magnetized Water Application on Maize Seed Emergence in Sand Culture. In *J. Agr. Sci. Tech* (Vol. 16).
10. Mendoza-Elos, M., Mosqueda-Villagómez, C., Rangel-Lucio, J. A., López-Benítez, A., Rodríguez-Herrera, S. A., Latournerie-Moreno, L., & Moreno-Martinez, E. (2006). Densidad de población y fertilización nitrogenada en la clorofila, materia seca y rendimiento de maíz normal y QPM. *Agricultura técnica en México*.

11. SAGARPA. 2017. Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación. Planeación agrícola nacional 2017-2030. México, DF.
12. Sandía, L., Cabeza, M., Arandía, J y Bianchi, G. (1998). Agricultura, salud y ambiente. Caracas: CIDIAT-FUNDACIÓN POLAR.
13. Santos, L. K. C. (2018). El uso de la tecnología en la agricultura. Pro Sciences: Revista de Producción, Ciencias e Investigación. 2(14), 25-32.
14. Sellanes, L. M. (2023). Manual práctico de electrocultivos: Una guía útil para obtener la soberanía alimentaria. Independently Published.