



Application of electric fields to stimulate the germination and growth of native maize seeds

Aplicación de campos eléctricos para estimular la germinación y el crecimiento de semillas de maíz autóctono

Elvira Gutiérrez-Bonilla¹; Gabriela Roa-Morales^{1*};

Patricia Balderas-Hernández¹; Rodolfo Serrato-Cuevas²

¹Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM. Carretera Toluca-Atlaquemulco km 14.5, Unidad San Cayetano, Toluca, Estado de México, C. P. 50200, México.

²Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas. El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, C. P. 50200, México.

*Corresponding author: groam@uaemex.mx, tel. 722 276 6610.

Abstract

Introduction: The conservation of native maize seeds is essential for preserving genetic diversity, cultural heritage, and food security in rural communities.

Objective: To evaluate the effects of two low-intensity electric fields (0.2 and 0.4 V·cm⁻¹) on seed germination, seedling growth, biomass production, and soil macronutrient dynamics in Palomero Toluqueño maize.

Methodology: Native maize seeds were exposed to electric fields of 0.2 and 0.4 V·cm⁻¹ for 3 h using platinum-coated titanium mesh electrodes. Germination parameters and seedling growth traits were assessed.

Results: Exposure to 0.4 V·cm⁻¹ significantly enhanced seed performance, increasing germination by 42 % relative to the control. After 24 days of growth, treated plants exhibited greater stem length, stem thickness, and width of the last true leaf, with increases of 3.37, 2.77, and 1.77 %, respectively, while at 31 days, root length and total biomass accumulation increased by 42.03 and 42.62 %, respectively, compared with the control.

Limitations of the study: The biological response depends on the intensity of the applied electric field.

Originality: This study provides the first evidence of the effects of low-intensity electric fields on the germination and early development of Palomero Toluqueño maize seeds.

Conclusions: The results support the potential application of electric fields as an environmentally friendly strategy for enhancing the conservation and propagation of native maize genetic resources.

Keywords: native *Tolonqui* maize, plant stimulation, conservation, agricultural soil.

Resumen

Introducción: La conservación de semillas de maíz autóctonas es fundamental para preservar la diversidad genética, el patrimonio cultural y la seguridad alimentaria en las comunidades rurales.

Objetivo: Evaluar los efectos de dos campos eléctricos de baja intensidad (0.2 y 0.4 V·cm⁻¹) en la germinación de semillas, el crecimiento de plántulas, la producción de biomasa y la dinámica de macronutrientes del suelo en maíz Palomero Toluqueño.

Metodología: Las semillas de maíz autóctono se expusieron a campos eléctricos de 0.2 y 0.4 V·cm⁻¹ durante 3 h con electrodos de malla de titanio recubiertos de platino. Se evaluaron los parámetros de germinación y los rasgos de crecimiento de las plántulas.

Resultados: La exposición a 0.4 V·cm⁻¹ mejoró significativamente el rendimiento de las semillas, con un incremento de 42 % en la germinación con respecto al testigo. Después de 24 días de crecimiento, las plantas tratadas presentaron mayor longitud de tallo, grosor de tallo y ancho de la última hoja verdadera, con aumentos de 3.37, 2.77 y 1.77 %, respectivamente, mientras que a los 31 días incrementaron la longitud de las raíces y la acumulación total de biomasa en un 42.03 y 42.62 %, respectivamente, en comparación con el testigo.

Limitaciones del estudio: La respuesta biológica depende de la intensidad del campo eléctrico aplicado.

Originalidad: Este estudio aporta la primera evidencia de los efectos de campos eléctricos de baja intensidad sobre la germinación y el desarrollo inicial de semillas de maíz Palomero Toluqueño.

Conclusiones: Los resultados respaldan la aplicación de campos eléctricos como estrategia respetuosa con el medio ambiente para mejorar la conservación y la propagación de los recursos genéticos del maíz autóctono.

Palabras clave: maíz autóctono Tolonqui, estimulación vegetal, conservación, suelo agrícola.



Introduction

Natural electric fields play an important role in biological systems, influencing physiological processes such as seed germination, cell division, nutrient transport, and plant growth (Barman & Bhattacharya, 2016). These electrical phenomena interact with environmental factors, including soil properties, which are essential for plant development and the maintenance of microbial communities responsible for nutrient cycling and soil fertility (Xu et al., 2022).

Agriculture faces increasing challenges associated with soil degradation, nutrient depletion, erosion, and climate change. The intensive use of agrochemicals to maintain crop productivity has contributed to environmental deterioration, prompting the search for sustainable alternatives capable of improving crop performance while reducing ecological impacts (Delgado-Ramírez et al., 2023; Purkaystha et al., 2022). In this context, physical stimulation technologies, including electric fields, magnetic fields, and acoustic treatments, have emerged as environmentally friendly approaches for enhancing seed germination, plant growth, and crop productivity (Ercan et al., 2022; Yao & Shen, 2015).

Electro-culture refers to the application of electrical energy to plants, seeds, or soil to stimulate physiological processes associated with growth and development (Mohd et al., 2018). Several studies have demonstrated that electric fields can improve germination rates, biomass accumulation, and seedling vigor, while reducing dependence on chemical inputs (Mamlıc et al., 2021). For example, Sıngerorzan et al. (2022) reported enhanced germination and early seedling development in fir seeds exposed to electrical stimulation. Similarly, low-intensity electric fields have been associated with increased metabolic activity, improved growth, and enhanced production of secondary metabolites without causing detrimental effects on plant tissues or soil microorganisms (Guderjan et al., 2005; Ye et al., 2004). These findings suggest that electrical stimulation may represent a viable strategy for improving the establishment and productivity of crops of agronomic and ecological importance.

Among these crops, maize (*Zea mays* L.) is one of the most important cereals worldwide and constitutes the foundation of food security for millions of people. Mexico is recognized as a center of origin and diversification of maize, harboring a vast diversity of native races that represent an invaluable reservoir of genetic, cultural, and agricultural heritage (Pérez-Ruiz et al., 2024).

One of the native races facing conservation concerns is the Palomero Toluqueño maize, an ancient popcorn maize cultivated by Otomi and Mazahua communities

Introducción

Los campos eléctricos naturales desempeñan un papel importante en los sistemas biológicos, ya que influyen en procesos fisiológicos como la germinación de las semillas, la división celular, el transporte de nutrientes y el crecimiento de las plantas (Barman & Bhattacharya, 2016). Estos fenómenos eléctricos interactúan con factores ambientales, como las propiedades del suelo, que son esenciales para el desarrollo de las plantas y el mantenimiento de las comunidades microbianas responsables del ciclo de los nutrientes y la fertilidad del suelo (Xu et al., 2022).

La agricultura se enfrenta a retos cada vez mayores relacionados con la degradación del suelo, el agotamiento de los nutrientes, la erosión y el cambio climático. El uso intensivo de agroquímicos para mantener la productividad de los cultivos ha contribuido al deterioro del medio ambiente, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles capaces de mejorar el rendimiento de los cultivos y, al mismo tiempo, reducir el impacto ecológico (Delgado-Ramírez et al., 2023; Purkaystha et al., 2022). En este contexto, las tecnologías de estimulación física, como los campos eléctricos, los campos magnéticos y los tratamientos acústicos, se han consolidado como métodos respetuosos con el medio ambiente para mejorar la germinación de las semillas, el crecimiento de las plantas y la productividad de los cultivos (Ercan et al., 2022; Yao & Shen, 2015).

El término electrocultivo hace referencia a la aplicación de energía eléctrica a las plantas, las semillas o el suelo con el fin de estimular los procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento y el desarrollo (Mohd et al., 2018). Diversos estudios han demostrado que los campos eléctricos pueden mejorar las tasas de germinación, la acumulación de biomasa y el vigor de las plántulas, al tiempo que reducen la dependencia de insumos químicos (Mamlıc et al., 2021). Por ejemplo, Sıngerorzan et al. (2022) observaron una mejora en la germinación y el desarrollo inicial de plántulas de semillas de abeto expuestas a estimulación eléctrica. Del mismo modo, los campos eléctricos de baja intensidad se han relacionado con un aumento de la actividad metabólica, el crecimiento y la producción de metabolitos secundarios, sin causar efectos perjudiciales en los tejidos vegetales ni en los microorganismos del suelo (Guderjan et al., 2005; Ye et al., 2004). Estos resultados sugieren que la estimulación eléctrica podría constituir una estrategia viable para mejorar el establecimiento y la productividad de cultivos de importancia agronómica y ecológica.

Entre estos cultivos, el maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cereales más importantes a nivel mundial y constituye la base de la seguridad alimentaria de millones de personas. México es reconocido como centro de origen y diversificación del maíz, ya que alberga una gran

in the north-central part of the State of Mexico (Granados-Laudino, 2020). This race is characterized by having small ears with numerous intertwined rows, pointed kernels, and high popping capacity, attributes associated with its hard and dense endosperm (Bautista-Ramírez et al., 2018). Beyond its cultural and gastronomic significance, Palomero Toluqueño maize possesses valuable genetic diversity that may contribute to breeding programs aimed at improving stress tolerance, adaptation, and productivity in maize (Bautista-Ramírez et al., 2019). Despite its importance, ethnobotanical studies indicate that its cultivation has become increasingly restricted, raising concerns regarding its long-term conservation.

Although the effects of electric fields have been investigated in several plant species, information regarding their influence on the germination and early growth of native Mexican maize races remains scarce. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of two low-intensity electric fields (0.2 and 0.4 V·cm⁻¹) on seed germination, seedling growth, biomass production, and soil macronutrient dynamics in Palomero Toluqueño maize. The findings may contribute to the development of sustainable strategies for the conservation, propagation, and productive use of native maize genetic resources of high cultural, ecological, and socioeconomic value.

Materials and methods

Obtaining seeds and sampling soil

Palomero Toluqueño maize (*Zea mays* L. var. Everta), locally known as *Tolonqui* in the Otomí language, was donated by an agricultural producer from the community of San Marcos Tlaxalpan, municipality of Morelos, State of Mexico, Mexico (19° 48' 15.5" N and 99° 43' 05.1" W). In addition, agricultural soil was collected in accordance with the guidelines established by the Mexican Official Standard NOM-021-SEMARNAT-2000 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2002). Surface soil (0–20 cm depth) was sampled after removing plant residues and stones. Composite samples were homogenized and used throughout the experiment to ensure uniformity among treatments.

Electrical treatment of Palomero Toluqueño maize seeds

Two electric field intensities (0.2 and 0.4 V·cm⁻¹) were evaluated using a direct current power supply (LW-3010EC, Longwei, China) coupled to platinum-coated titanium mesh electrodes (10 × 5 cm), which served as anode and cathode. The selected electric field intensities were based on previous studies reporting

diversidad de variedades autóctonas que representan un patrimonio genético, cultural y agrícola de valor incalculable (Pérez-Ruiz et al., 2024).

Una de las variedades autóctonas de mayor preocupación en materia de conservación es el maíz Palomero Toluqueño, una raza ancestral cultivada por las comunidades otomíes y mazahuas en la zona centro-norte del Estado de México (Granados-Laudino, 2020). Esta raza se caracteriza por tener mazorcas pequeñas con numerosas hileras entrelazadas, granos puntiagudos y una elevada capacidad de reventado, atributos asociados a su endospermo duro y denso (Bautista-Ramírez et al., 2018). Más allá de su importancia cultural y gastronómica, el maíz Palomero Toluqueño posee una valiosa diversidad genética que puede contribuir a los programas de mejoramiento orientados a incrementar la tolerancia al estrés, la adaptabilidad y la productividad del maíz (Bautista-Ramírez et al., 2019). A pesar de su valor, los estudios etnobotánicos indican que su cultivo se ha ido restringiendo, lo que genera preocupación en cuanto a su conservación a largo plazo.

Aunque se han estudiado los efectos de los campos eléctricos en varias especies vegetales, la información sobre su influencia en la germinación y el crecimiento inicial de las variedades autóctonas de maíz mexicano aún es escasa. Por ello, el objetivo del presente estudio fue evaluar los efectos de dos campos eléctricos de baja intensidad (0.2 y 0.4 V·cm⁻¹) sobre la germinación de las semillas, el crecimiento de las plántulas, la producción de biomasa y la dinámica de los macronutrientes del suelo en maíz Palomero Toluqueño. Los resultados pueden contribuir al desarrollo de estrategias sostenibles para la conservación, la propagación y el uso productivo de los recursos genéticos del maíz autóctono, el cual tiene un gran valor cultural, ecológico y socioeconómico.

Materiales y métodos

Obtención de semillas y muestreo del suelo

El maíz Palomero Toluqueño (*Zea mays* L. var. Everta), conocido localmente como Tolonqui en lengua otomí, fue donado por un productor de la comunidad de San Marcos Tlaxalpan, municipio de Morelos, Estado de México, México (19° 48' 15.5" N y 99° 43' 05.1" O). Asimismo, se recogieron muestras de suelo agrícola, de acuerdo con las directrices establecidas por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2002). Se tomaron muestras de la capa superficial del suelo (0–20 cm de profundidad) después de retirar los residuos vegetales y las piedras. Las muestras compuestas se homogeneizaron y se utilizaron en todo el experimento para garantizar la uniformidad entre los tratamientos.

beneficial effects of low- and moderate-intensity electrical stimulation on seed germination and early plant development. In contrast, higher electric field intensities ($>1.0 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$) have been reported to inhibit the growth of certain maize organs, particularly the root, mesocotyl, and coleoptile (Karcz & Burdach, 2022).

All tests were performed in duplicate under laboratory conditions, with temperatures ranging from 10 to 21 °C and a 12 h light/12 h dark photoperiod. For this purpose, plastic cells of 17.5 cm long, 12.5 cm wide, and 6.0 cm deep were used, filled with 800 g of dry soil. The same soil batch was used for all treatments to minimize variability associated with soil properties.

For each experimental unit, 25 seeds were sown at a depth of 0.5–1.0 cm and arranged in five rows containing five seeds each, with approximately 2 cm spacing between seeds (Figure 1). Electrodes were inserted in a parallel face-to-face arrangement with a separation distance of 12.5 cm. Soil moisture was adjusted to 40–50 % and maintained within this range throughout the experimental period.

The electric fields were applied continuously for 3 h. Untreated seeds were used as controls. Following treatment, seed germination and seedling emergence were monitored daily. The exposure time was selected according to Acosta-Santoyo et al. (2017), who report

Tratamiento eléctrico de las semillas de maíz Palomero Toluqueño

Se evaluaron dos intensidades de campo eléctrico (0.2 y $0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$) a partir de una fuente de alimentación de corriente continua (LW-3010EC, Longwei, China) acoplada a electrodos de malla de titanio recubiertos de platino ($10 \times 5 \text{ cm}$), los cuales actuaban como ánodo y cátodo. Las intensidades del campo eléctrico seleccionadas se basaron en estudios previos que señalaban los beneficios de la estimulación eléctrica de intensidad baja y moderada sobre la germinación de las semillas y el desarrollo inicial de las plantas. Por el contrario, se ha descrito que las intensidades elevadas ($>1.0 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$) inhiben el crecimiento de algunos órganos del maíz, en particular la raíz, el mesocotilo y el coleóptilo (Karcz & Burdach, 2022).

Todos los ensayos se realizaron por duplicado en condiciones de laboratorio, con temperaturas entre 10 y 21 °C y fotoperíodo de 12 h de luz y 12 h de oscuridad. Para ello, se utilizaron charolas de plástico de 17.5 cm de largo, 12.5 cm de ancho y 6.0 cm de profundidad, rellenas con 800 g de tierra seca. Se utilizó el mismo lote de suelo en todos los tratamientos para minimizar la variabilidad asociada a las propiedades del suelo.

En cada unidad experimental se sembraron 25 semillas a una profundidad de 0.5 a 1.0 cm, dispuestas en cinco

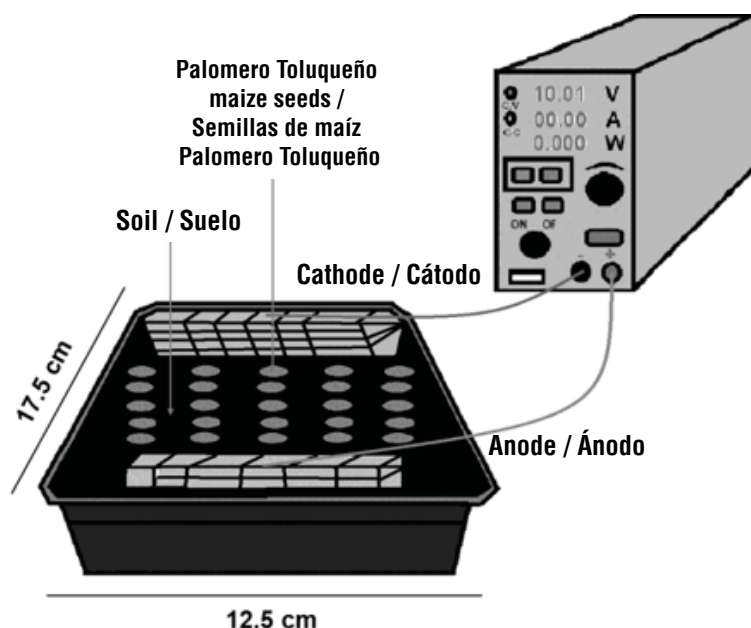


Figure 1. Experimental setup of electrodes and the distribution of Palomero Toluqueño maize (*Zea mays* L. var. Everta) seeds within the cultivation cell used for applying the electric field (0.2 and $0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$).

Figura 1. Representación del arreglo experimental de los electrodos y la distribución de las semillas de maíz Palomero Toluqueño (*Zea mays* L. var. Everta) en la charola de cultivo utilizada para la aplicación del campo eléctrico (0.2 y $0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$).

that moderate and prolonged electrical stimulation can induce physiological and metabolic responses associated with improved seed performance.

A linear electrode arrangement was selected due to the limited dimensions of the experimental units and to facilitate ion transport between electrodes. This configuration has been reported as suitable for laboratory-scale electroculture experiments; however, for open-field applications, it is recommended to use circular arrangements, which allow for greater efficiency (Morales et al., 2021).

Physiological characterization of Palomero Toluqueño maize plants

Germination and seedling emergence were evaluated throughout the experimental period. At 24 days after sowing, 20 plants per treatment were randomly selected for morphological characterization. Stem thickness was measured using a digital caliper (± 0.02 mm accuracy), whereas stem length and leaf dimensions (length and width) were determined using a measuring tape (± 0.5 mm accuracy). Vegetative growth stage and the number of true leaves were also recorded.

Root traits were evaluated 31 days after sowing. Root length was measured using a measuring tape (± 0.5 mm accuracy). Biomass production was determined in aerial parts and roots separately, drying them at 80 °C until constant weight.

Soil characterization

Soil pH and electrical conductivity (EC) were measured using a portable pH/conductivity meter (PC18, Conductronic, Mexico). Soil organic matter (OM) was determined according to the Walkley and Black (1934) method. Cation exchange capacity (CEC) was determined in accordance with the standard NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). To determine the exchangeable bases of Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , and K^+ , extraction was performed with 1 N ammonium acetate. Mg^{2+} and Ca^{2+} were quantified by UV-Vis spectrophotometry (20D, Milton Roy, USA), while Na^+ and K^+ were determined by atomic emission spectroscopy (410, Corning, UK). Extractable P was determined by the Bray and Kurtz (1945) method, and total nitrogen (TNK) was quantified using the Kjeldahl method. Bulk density (BD) was obtained using the test-tube method, and soil texture was analyzed following the Bouyoucos procedure (Mwendwa, 2022).

Experimental design and statistical analysis

The experiment was established under a completely randomized design with three treatments: 0 (control), 0.2, and 0.4 V·cm⁻¹. The data were subjected to analysis

filas de cinco semillas cada una, con una separación de aproximadamente 2 cm entre semillas (Figura 1). Los electrodos se colocaron en paralelo, uno frente al otro, a una distancia de 12.5 cm. La humedad del suelo se ajustó a un valor entre 40 y 50 %, el cual se mantuvo durante todo el experimento.

Los campos eléctricos se aplicaron de forma continua durante 3 h. Se utilizaron semillas sin tratar como testigos. Después del tratamiento, se monitoreó diariamente la germinación de las semillas y la aparición de las plántulas. El tiempo de exposición se seleccionó de acuerdo con lo establecido por Acosta-Santoyo et al. (2017), quienes mencionan que la estimulación eléctrica moderada y prolongada puede inducir respuestas fisiológicas y metabólicas asociadas a un mejor rendimiento de las semillas.

Se eligió una disposición lineal de los electrodos debido a las dimensiones limitadas de las unidades experimentales y para facilitar el transporte de los iones entre los electrodos. Se ha documentado que esta configuración es adecuada para experimentos de electrocultivo a escala de laboratorio; sin embargo, para aplicaciones en campo abierto, se recomienda utilizar disposiciones circulares, que permiten una mayor eficiencia (Morales et al., 2021).

Caracterización fisiológica de las plantas de maíz Palomero Toluqueño

La germinación y la emergencia se evaluaron durante todo el periodo experimental. A los 24 días después de la siembra, se seleccionaron al azar 20 plantas por tratamiento para su caracterización morfológica. El grosor del tallo se midió con un vernier digital (precisión de ± 0.02 mm), mientras que la longitud del tallo y las dimensiones de las hojas (longitud y anchura) se midieron con una cinta métrica (precisión de ± 0.5 mm). Asimismo, se registraron la fase de crecimiento vegetativo y el número de hojas verdaderas.

Las características de las raíces se evaluaron 31 días después de la siembra. La longitud de las raíces se midió con una cinta métrica (precisión de ± 0.5 mm). La producción de biomasa se determinó en las partes aéreas y las raíces por separado, secándolas a 80 °C hasta peso constante.

Caracterización del suelo

El pH y la conductividad eléctrica (CE) del suelo se midieron con un medidor portátil de pH y conductividad (PC18, Conductronic, México). La materia orgánica del suelo (MO) se determinó según la metodología de Walkley y Black (1934). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó de acuerdo con la norma

of variance and Tukey's mean comparison test ($\alpha = 0.05$). Statistical analyses were performed using Minitab 2019 software (Minitab Inc., State College, PA, USA).

Results and discussion

Treatment with $0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ improved both the germination rate and germination speed of Palomero Toluqueño maize seeds, reaching 96 % germination on the third day and 100 % on the fourth day after treatment (Figure 2). In contrast, seeds treated with $0.2 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ reached 76 % germination on the third day and 100 % by the fifth day. The control exhibited 54 % germination on the third day and reached 100 % germination on the fifth day. These results indicate that electroculture using platinized titanium electrodes and a moderate electric field ($0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$) significantly increased the germination rate ($p = 0.008$). This effect may be attributed to the enhanced mobilization of ions in the soil. According to Xu et al. (2025), electric fields increase the availability of the main exchangeable cations (Ca^{2+} and K^+), thereby improving the CEC and increasing soil pH. The increased ion mobility and availability may have promoted dormancy breaking in Palomero Toluqueño maize seeds, resulting in faster germination (Acosta-Santoyo et al., 2018).

Another factor that may have contributed to the increase in germination is the enhanced availability and mobility of water in the soil through an improved free-to-bound water ratio. In addition, electric fields may increase the activity of hydrolytic enzymes, such

NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002). Para determinar las bases intercambiables de Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ y K^+ , se llevó a cabo una extracción con acetato de amonio 1 N. El Mg^{2+} y el Ca^{2+} se cuantificaron mediante espectrofotometría UV-Vis (20D, Milton Roy, EUA), mientras que el Na^+ y el K^+ se determinaron mediante espectroscopía de emisión atómica (410, Corning, Reino Unido). El P extraíble se determinó por el método de Bray y Kurtz (1945), y el nitrógeno total (TNK) se cuantificó por el método de Kjeldahl. La densidad aparente (DA) se obtuvo mediante el método del tubo de ensayo y la textura del suelo se analizó de acuerdo con el procedimiento de Bouyoucos (Mwendwa, 2022).

Diseño experimental y análisis estadístico

El experimento se estableció bajo un diseño completamente al azar con tres tratamientos: 0 (testigo), 0.2 y $0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$. Los datos se sometieron a un análisis de varianza y a la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa Minitab 2019 (Minitab Inc., State College, Pensilvania, EUA).

Resultados y discusión

El tratamiento con $0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ mejoró tanto la tasa como la velocidad de germinación de las semillas de maíz Palomero Toluqueño, al alcanzar un 96 % de germinación al tercer día y un 100 % al cuarto día después de la aplicación del tratamiento (Figura 2). Por el contrario, las semillas tratadas con $0.2 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ alcanzaron un 76 %

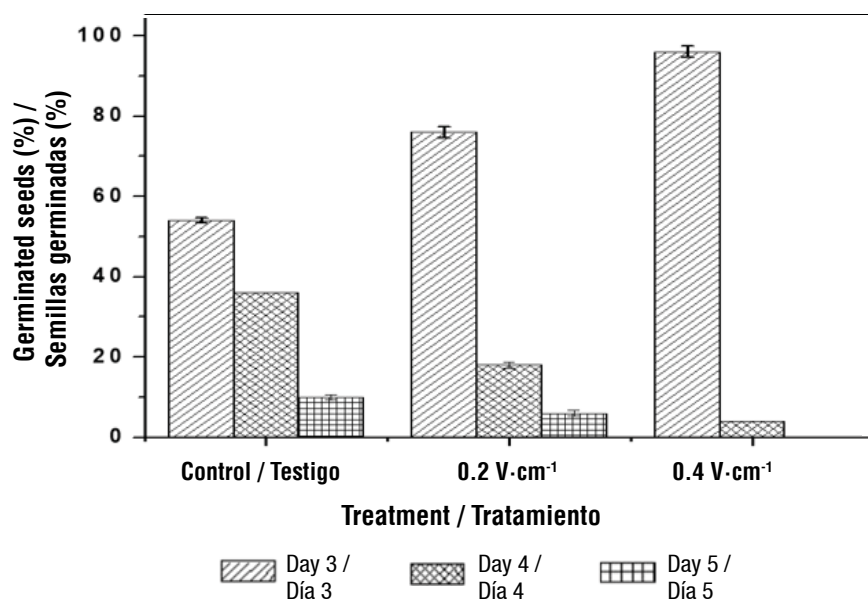


Figure 2. Germination of Palomero Toluqueño maize (*Zea mays* L. var. Everta) seeds following the application of electric fields.

Figura 2. Germinación de semillas de maíz Palomero Toluqueño (*Zea mays* L. var. Everta) después de la aplicación de campos eléctricos.

as amylases, which hydrolyze starch into simple sugars required for seed germination (Ma et al., 2024).

The seedling emergence results are presented in Figure 3. Seeds treated with $0.2 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ exhibited an emergence rate of 82 % on day six, followed by 6 % on day seven and 8 % on day eight, whereas the remaining 4 % did not emerge. In contrast, seeds treated with $0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ reached 90 % emergence on day six, and the remaining 10 % did not emerge. The control treatment reached a final emergence of 94 % on day ten, with the highest emergence (66 %) recorded on day six; the remaining 6 % failed to emerge (Figure 3). These results indicate that applying $0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ significantly increased both the rate and speed of seedling emergence ($p = 0.03$) compared with the control. This response may be associated with the ability of external electric fields to stimulate membrane proteins involved in the transport of ions, nutrients, and auxins. In addition, electric fields have been reported to accelerate metabolism and enhance the activity of antioxidant enzymes, improving plant tolerance to diseases and abiotic stress (Lee & Oh, 2021).

The physiological properties of the plants were evaluated at the V4 phenological stage, identified by the presence of the ligule on the fourth true leaf, 24 days after sowing. This stage is considered critical because it is when the crop density is established. According to the analysis of variance, the evaluated treatments showed no significant differences ($p > 0.05$) in physiological characteristics (Table 1). This response

de germinación al tercer día y un 100 % hasta el quinto día. El testigo presentó un 54 % de germinación el tercer día y alcanzó el 100 % de germinación el quinto día. Estos resultados indican que el electrocultivo, mediante electrodos de titanio platinados y un campo eléctrico moderado ($0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$), aumentó significativamente la tasa de germinación ($p = 0.008$). Este efecto se puede atribuir a una mayor movilización de iones en el suelo. De acuerdo con Xu et al. (2025), los campos eléctricos aumentan la disponibilidad de los principales cationes intercambiables (Ca^{2+} y K^+), lo que mejora la CIC y eleva el pH del suelo. La mayor movilidad y disponibilidad de iones pudieron haber favorecido la ruptura de la dormancia en las semillas de maíz Palomero Toluqueño, lo que resultó en una germinación más rápida (Acosta-Santoyo et al., 2018).

Otro factor que pudo haber contribuido al aumento de la germinación es la mayor disponibilidad y movilidad del agua en el suelo debido a una mejora en la relación entre agua libre y agua ligada. Además, los campos eléctricos pueden aumentar la actividad de las enzimas hidrolíticas, como las amilasas, que hidrolizan el almidón en azúcares simples necesarios para la germinación de las semillas (Ma et al., 2024).

Los resultados de la emergencia de las plántulas se presentan en la Figura 3. Las semillas tratadas con $0.2 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ presentaron una tasa de emergencia de 82 % el día seis, seguida de un 6 % el día siete y 8 % el día ocho, mientras que el 4 % restante no emergió. Por su parte, las semillas tratadas con $0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ alcanzaron un 90 % de emergencia el día seis y el 10 % restante no emergió.

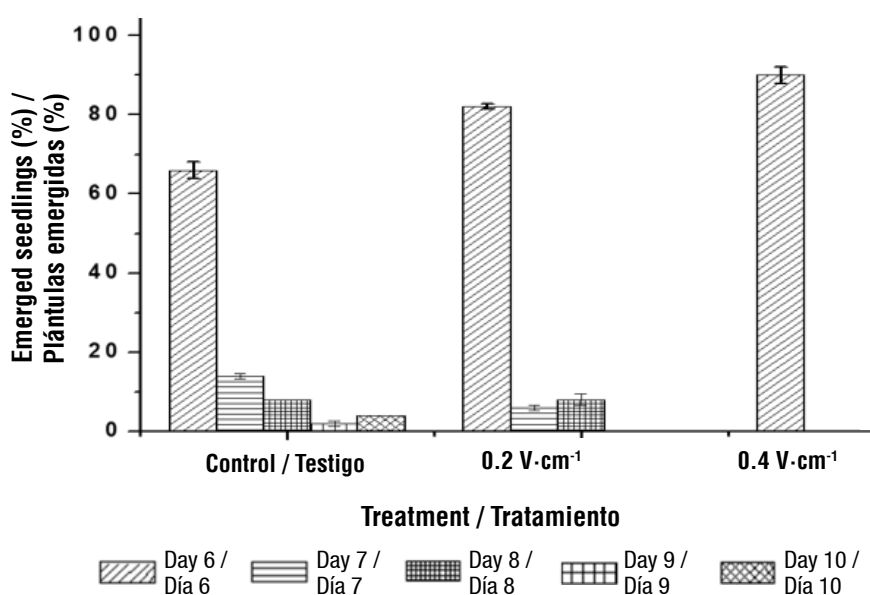


Figure 3. Emergence of Palomero Toluqueño maize (*Zea mays* L. var. Everta) seedlings treated with different electric fields.

Figura 3. Emergencia de plántulas de semillas de maíz Palomero Toluqueño (*Zea mays* L. var. Everta) tratadas con diferentes campos eléctricos.

Table 1. Comparison of means of the physiological characteristics of plants from Palomero Toluqueño maize (*Zea mays* L. var. Everta) seeds treated with different electric fields after 24 days of growth.

Cuadro 1. Comparación de medias de características fisiológicas de plantas de semillas de maíz Palomero Toluqueño (*Zea mays* L. var. Everta) tratadas con diferentes campos eléctricos después de 24 días de crecimiento.

Treatments / Tratamientos	Stem length (cm) / Longitud del tallo (cm)	Stem thickness (cm) / Grosor del tallo (cm)	NTL / NHV	LLTL (cm) / LUHV (cm)	WLTL (cm) / AUHV (cm)
Control/Testigo	13.64 ± 1.60 a	0.36 ± 0.007 a	4.20 ± 0.14 a	31.88 ± 1.29 a	1.12 ± 0.09 a
0.2 V·cm ⁻¹	14.05 ± 0.04 a	0.37 ± 0.02 a	4.55 ± 0.70 a	32.76 ± 0.91 a	1.07 ± 0.18 a
0.4 V·cm ⁻¹	14.10 ± 0.14 a	0.37 ± 0.03 a	4.30 ± 0.56 a	32.20 ± 0.49 a	1.14 ± 0.04 a

NTL: number of true leaves; LLTL: length of last true leaf; WLTL: width of last true leaf. Means followed by different letters within each column indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

NHV: número de hojas verdaderas; LUHV: longitud de la última hoja verdadera; AUHV: ancho de la última hoja verdadera. Medias seguidas de letras distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

may be associated with the 3 h electrical stimulation period, which was shorter than the exposure times (4, 8, and 12 h) previously reported for maize (Acuña et al., 2022).

Concepcion et al. (2021) evaluated an electroculture system using electric fields of 0.4 V·cm⁻¹ in three Philippine hybrid maize genotypes and concluded that electrical stimulation can promote dormancy breaking, improve plant growth, and enhance crop quality. However, the effectiveness of the treatment depended on both the genotype and the application time. Therefore, the optimal electroculture conditions, including electric field intensity, exposure time, and electrode material, should be determined individually for each seed type. Likewise, longer exposure times combined with moderate electric field intensities must be evaluated to determine the influence of treatment duration on the physiological traits of Palomero Toluqueño maize plants.

Following the evaluation at the V4 stage, plant development continued through active growth of the apical meristem, resulting in further shoot elongation. The experiment was terminated after approximately one month to prevent root restriction, as the dimensions of the electroculture cells and the amount of soil available would not have supported adequate plant development during later growth stages.

Figure 4 shows the root length after 31 days of growth. Plants treated with 0.4 and 0.2 V·cm⁻¹ exhibited average root lengths of 39.23 and 28.57 cm, respectively. According to Gaspar et al. (2002), this response may be attributed to the interaction of electric fields with the membrane. The application of external electric fields alters the transmembrane potential of root cells, leading to physiological changes because the plasma membrane functions as a sensor of environmental changes.

El testigo alcanzó una tasa de emergencia final de 94 % el día diez, habiéndose registrado el valor más alto (66 %) el día seis; el 6 % restante no emergió (Figura 3). Estos resultados indican que la aplicación de 0.4 V·cm⁻¹ aumentó significativamente tanto la tasa como la velocidad de emergencia de las plántulas ($p = 0.03$) en comparación con el testigo. Esta respuesta podría estar relacionada con la capacidad de los campos eléctricos externos para estimular las proteínas de membrana implicadas en el transporte de iones, nutrientes y auxinas. Asimismo, se ha demostrado que los campos eléctricos aceleran el metabolismo y potencian la actividad de las enzimas antioxidantes, lo que mejora la tolerancia de las plantas a las enfermedades y al estrés abiótico (Lee & Oh, 2021).

Las propiedades fisiológicas de las plantas se evaluaron en la fase fenológica V4, identificada por la presencia de la lígula en la cuarta hoja verdadera, 24 días después de la siembra. Esta fase se considera crítica porque es cuando se establece la densidad del cultivo. De acuerdo con el análisis de varianza, los tratamientos evaluados no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) en cuanto a las características fisiológicas (Cuadro 1). Esta respuesta podría estar relacionada con el periodo de estimulación eléctrica de 3 h, que fue más corto que los tiempos de exposición (4, 8 y 12 h) descritos anteriormente para el maíz (Acuña et al., 2022).

Concepcion et al. (2021) evaluaron un sistema de electrocultivo con campos eléctricos de 0.4 V·cm⁻¹ en tres genotipos de maíz híbrido filipino y concluyeron que la estimulación eléctrica puede favorecer la ruptura de la latencia, mejorar el crecimiento de las plantas y potenciar la calidad del cultivo. Sin embargo, la eficacia del tratamiento dependía tanto del genotipo como del momento de aplicación. Por lo tanto, las condiciones óptimas de electrocultivo, como la intensidad del campo eléctrico, el tiempo de exposición y el material de los electrodos, se deben determinar de forma individual para cada tipo de semilla. Asimismo, se

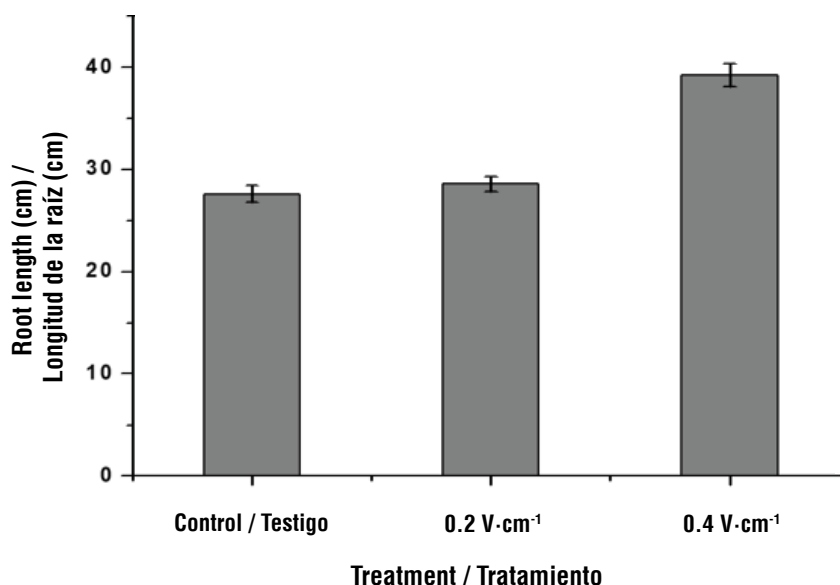


Figure 4. Average root lengths of plants from Palomero Toluqueño maize (*Zea mays* L. var. Everta) seeds treated with different electric fields 31 days after application.

Figura 4. Longitud promedio de las raíces de las plantas de semillas de maíz Palomero Toluqueño (*Zea mays* L. var. Everta) tratadas con diferentes campos eléctricos después de 31 días de la aplicación.

Following the evaluation of the physiological traits and root development, the plant material was dried to determine biomass, which included both the aerial (stems and leaves) and underground (roots) parts of the plants. Significant differences ($p < 0.05$) were detected between treatments for both aerial and root biomass (Table 2). In particular, treatment with $0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ increased total biomass by 42.62 % compared with the control. Xu et al. (2022) reported an 8.9 % increase in the biomass of *Solanum nigrum* L. following the application of a $1 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ for 3 h using stainless steel electrodes. Likewise, Morales et al. (2021) reported a 53 % increase in biomass and a greater root length in *Cucumis sativus* treated with low-intensity electric fields ($0.2 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$).

These results confirm that the application of a moderate-intensity electric field significantly influenced plant biomass, which was associated with root development. As the primary organ responsible for water and nutrient uptake, the root system plays a fundamental role in supporting aerial growth (Dannehl, 2018). This relationship was evident in plants treated with $0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$, which exhibited the greatest average root length (39.23 cm) and an 83.23 % increase in root biomass compared with the control treatment (Table 2). This response was mainly associated with the greater development of the root system.

The application of electric fields to seeds and plants grown in agricultural soil is commonly referred to as electrical fertilization, as it is considered a physical fertilization strategy with promising potential for

deben evaluar tiempos de exposición más prolongados, combinados con intensidades moderadas del campo eléctrico, para determinar la influencia de la duración del tratamiento en los rasgos fisiológicos de las plantas de maíz Palomero Toluqueño.

Después de la evaluación en la fase V4, el desarrollo de la planta continuó mediante el crecimiento activo del meristemo apical, lo que incrementó la elongación del tallo. El experimento se detuvo después de un mes para evitar la restricción del crecimiento radicular, ya que las dimensiones de las charolas de electrocultivo y la cantidad de tierra disponible no habrían permitido un desarrollo adecuado de las plantas durante las etapas posteriores de crecimiento.

La Figura 4 muestra la longitud de las raíces después de 31 días de crecimiento. Las plantas tratadas con 0.4 y $0.2 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ presentaron una longitud promedio de raíces de 39.23 y 28.57 cm, respectivamente. De acuerdo con Gaspar et al. (2002), esta respuesta se puede atribuir a la interacción de los campos eléctricos con la membrana. La aplicación de campos eléctricos externos altera el potencial transmembranario de las células radiculares, lo que da lugar a cambios fisiológicos, ya que la membrana plasmática actúa como sensor de los cambios ambientales.

Después de evaluar las características fisiológicas y el desarrollo radicular, el material vegetal se secó para determinar la biomasa, tanto de las partes aéreas (tallos y hojas) como de las subterráneas (raíces). Se

Table 2. Comparison of means of the plant biomass from Palomero Toluqueño maize (*Zea mays* L. var. Everta) seeds treated with different electric fields 31 days after application.

Cuadro 2. Comparación de medias de la biomasa de plantas de semillas de maíz Palomero Toluqueño (*Zea mays* L. var. Everta) tratadas con diferentes campos eléctricos 31 días después de la aplicación.

Treatments / Tratamientos	Aerial part (g) / Parte aérea (g)	Roots (g) / Raíces (g)	Total (g)
Control / Testigo	3.76 ± 0.09 b	1.73 ± 0.02 c	5.49 ± 0.12 b
0.2 V·cm ⁻¹	4.62 ± 0.09 a	2.72 ± 0.05 b	7.34 ± 0.15 a
0.4 V·cm ⁻¹	4.66 ± 0.02 a	3.17 ± 0.02 a	7.83 ± 0.04 a

Means followed by different letters within each column indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

Medias seguidas de letras distintas dentro de cada columna indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

sustainable agriculture (Crandall et al., 2024). To evaluate the effects of electroculture on soil properties, the physicochemical characteristics of the soils from the three treatments were analyzed after 31 days of plant growth. In this context, significant differences ($p < 0.05$) were detected only for Ca^{2+} and P concentrations among treatments (Table 3).

The experimental soil was classified as moderately acidic, and its pH increased slightly with the application of electric fields (Table 3), although there were no significant differences among treatments ($p > 0.05$). The treated soils reached pH values of 6.65 and 6.70 for the 0.2 and 0.4 V·cm⁻¹ treatments, respectively, which are considered favorable for crop growth.

Changes in soil pH induced by electric field application have been attributed to the formation of an acidic front near the anode and an alkaline front near the cathode during electrolysis. At high electric field intensities, these pH gradients may become pronounced enough to induce phytotoxic effects, impairing coleoptile emergence, seedling development, plant survival, and soil microbial activity near the electrodes (Acosta-Santoyo et al., 2019). However, under the conditions evaluated in the present study, the moderate electric field intensities produced only slight pH changes that were not associated with detrimental effects on plant growth.

The electrolysis of water at the electrodes may also have improved nutrient solubility through enhanced ion transport and changes in nutrient speciation, thereby increasing their availability and uptake by plants. According to Acosta-Santoyo et al. (2018), these processes may promote root hair formation and improve the absorption of water and essential nutrients, thereby contributing to the greater aerial growth observed in the electroculture treatments (Table 2).

The EC values obtained (Table 3) were consistent with those reported by Acuña et al. (2022). According to NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002), EC values

detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos, tanto en la biomasa aérea como en la radicular (Cuadro 2). En concreto, el tratamiento con 0.4 V·cm⁻¹ aumentó la biomasa total en un 42.62 % en comparación con el testigo. Xu et al. (2022) observaron un aumento de 8.9 % en la biomasa de *Solanum nigrum* L. tratado con 1 V·cm⁻¹ durante 3 h con electrodos de acero inoxidable. Del mismo modo, Morales et al. (2021) observaron un aumento de 53 % en la biomasa y una mayor longitud de las raíces en *Cucumis sativus* tratado con campos eléctricos de baja intensidad (0.2 V·cm⁻¹).

Estos resultados confirman que la aplicación de un campo eléctrico de intensidad moderada influyó significativamente en la biomasa vegetal, lo cual se asoció con el desarrollo radicular. Como principal órgano responsable de la absorción de agua y nutrientes, el sistema radicular desempeña un papel fundamental en el crecimiento aéreo (Dannehl, 2018). Esta relación se evidenció en las plantas tratadas con 0.4 V·cm⁻¹, las cuales presentaron la mayor longitud de las raíces (39.23 cm) y un aumento de 83.23 % en la biomasa radicular en comparación con el testigo (Cuadro 2). Esta respuesta se asoció principalmente a un mayor desarrollo del sistema radicular.

La aplicación de campos eléctricos a semillas y plantas cultivadas en suelo agrícola se conoce comúnmente como fertilización eléctrica, ya que se considera una estrategia de fertilización física con potencial prometedor para la agricultura sostenible (Crandall et al., 2024). Para evaluar los efectos del electrocultivo en las propiedades del suelo, se analizaron las características fisicoquímicas de los suelos de los tres tratamientos después de 31 días de crecimiento de las plantas. En este contexto, solo se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en las concentraciones de Ca^{2+} y P entre los tratamientos (Cuadro 3).

El suelo experimental se clasificó como moderadamente ácido y aumentó ligeramente su pH con la aplicación de campos eléctricos (Cuadro 3), aunque sin diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$). Los suelos tratados alcanzaron valores de pH de 6.65 y 6.70 en los

Table 3. Comparison of means of the physical and chemical properties of the soil 31 days after the application of electric fields.**Cuadro 3. Comparación de medias de las propiedades físicas y químicas del suelo 31 días después de la aplicación de campos eléctricos.**

Parameter/Parámetros	Control/Testigo	Treatments/Tratamientos	
		0.2 V·cm ⁻¹	0.4 V·cm ⁻¹
pH	4.90 ± 0.56 a	6.65 ± 0.28 a	6.70 ± 0.56 a
EC (dS·m ⁻¹)/CE (dS·m ⁻¹)	0.14 ± 0.01 ^a	0.23 ± 0.03 a	0.24 ± 0.08 a
OM (%)/MO (%)	1.68 ± 0.01 a	2.04 ± 0.06 a	2.04 ± 0.17 a
BD (g·cm ⁻³)/DA (g·cm ⁻³)	1.15 ± 0.01 a	1.14 ± 0.04 a	1.14 ± 0.01 a
CEC (cmol·kg ⁻¹)/CIC (cmol·kg ⁻¹)	28.75 ± 1.41 a	32.13 ± 2.22 a	32.5 ± 1.66 a
Mg ²⁺ (cmol·kg ⁻¹)	0.003 ± 0.00 a	0.001 ± 0.00 a	0.002 ± 0.00 a
Ca ²⁺ (cmol·kg ⁻¹)	0.04 ± 0.00 b	0.01 ± 0.00 c	0.1 ± 0.00 a
Na ⁺ (cmol·kg ⁻¹)	0.03 ± 0.00 a	0.05 ± 0.00 a	0.04 ± 0.01 a
K ⁺ (cmol·kg ⁻¹)	0.04 ± 0.00 a	0.05 ± 0.00 a	0.05 ± 0.00 a
P (mg·kg ⁻¹)	1.26 ± 0.14 b	1.79 ± 0.13 ab	1.92 ± 0.10 a
TNK (%)/NTK (%)	0.15 ± 0.04 a	0.14 ± 0.03 a	0.14 ± 0.02 a
Clay (%)/Arcilla (%)	21.68 ± 1.85	-	-
Sand (%)/Arena (%)	49.12 ± 1.95	-	-
Silt (%)/Limo (%)	29.20 ± 1.84	-	-

EC: electrical conductivity; OM: organic matter; BD: bulk density; CEC: cation exchange capacity; TNK: total nitrogen. Means followed by different letters within each row indicate significant differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

CE: conductividad eléctrica; MO: materia orgánica; DA: densidad aparente; CIC: capacidad de intercambio catiónico; NTK: nitrógeno total. Medias seguidas de letras distintas dentro de cada fila indican diferencias significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

below 1 dS·m⁻¹ indicate negligible salinity effects on the soil. Therefore, the electroculture treatments did not promote salt accumulation associated with the electrochemical processes generated by the applied electric fields.

The OM content of the control soil was low; although a slight increase was observed after the electroculture treatments (Table 3), no significant differences were detected ($p > 0.05$). Meanwhile, the BD decreased slightly after both electroculture treatments, indicating that the soil maintained a fine texture without evidence of compaction. Consequently, the treatments did not adversely affect the soil's moisture retention capacity, which is an important characteristic for crop establishment and development (Cid-Lazo et al., 2021).

The CEC values (Table 3) indicate that the soil had a high capacity for nutrient retention. According to NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002), CEC values ranging from 24 to 40 cmol·kg⁻¹ are classified as high and are associated with soils of good fertility due to their ability to retain and supply essential nutrients for plant growth. However, the concentrations of Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺, and P were low in all three treatments. Likewise, the NTK content was classified as low in all treatments (DOF, 2002). Although only Ca²⁺ and P showed statistically significant differences among

tratamientos de 0.2 y 0.4 V·cm⁻¹, respectivamente, lo que se considera favorable para el crecimiento de los cultivos.

Los cambios en el pH del suelo provocados por la aplicación de un campo eléctrico se han atribuido a la formación de un frente ácido cerca del ánodo y de un frente alcalino cerca del cátodo durante la electrólisis. A altas intensidades de campo eléctrico, estos gradientes de pH pueden llegar a ser lo suficientemente pronunciados como para provocar efectos fitotóxicos, lo que dificulta la emergencia del coleóptilo, el desarrollo de las plántulas, la supervivencia de las plantas y la actividad microbiana del suelo en las proximidades de los electrodos (Acosta-Santoyo et al., 2019). Sin embargo, bajo las condiciones evaluadas en el presente estudio, las intensidades moderadas del campo eléctrico solo provocaron ligeros cambios en el pH que no se asociaron con efectos perjudiciales para el crecimiento de las plantas.

La electrólisis del agua en los electrodos también pudo haber mejorado la solubilidad de los nutrientes debido a un mayor transporte de iones y a cambios en la especiación de los nutrientes, lo que aumenta su disponibilidad y absorción por las plantas. De acuerdo con Acosta-Santoyo et al. (2018), estos procesos pueden favorecer la formación de pelos radiculares y mejorar la absorción de agua y de nutrientes esenciales, lo que

treatments (Table 3), the observed changes suggest that electroculture may influence nutrient availability under the conditions evaluated.

The soil texture was classified as loam, indicating favorable conditions for agricultural production because of its balanced proportions of silt and clay, which contribute to adequate water retention and aeration. This classification is consistent with the BD values obtained (Table 3), confirming that the electroculture treatments did not adversely affect the physical quality of the soil. These findings suggest that the application of electric fields not only improves nutrient availability but also maintains the appropriate physicochemical conditions for plant growth. Nevertheless, additional studies are required to understand the mechanisms underlying electroculture and to evaluate its effectiveness in different agricultural soils and cropping systems.

In addition to electric field intensity, the selection of electrode material is an important factor influencing the performance of electroculture systems. In particular, the anode should be fabricated from a chemically stable material capable of maintaining adequate electrical conductivity while minimizing the release of potentially harmful ions into the soil solution. For this reason, platinized titanium was selected, as its high electrochemical stability allows efficient current transfer without increasing the concentration of toxic ions that could adversely affect soil quality or plant development (Acosta-Santoyo et al., 2019). However, it is important to evaluate the influence of other inexpensive electrode materials, such as graphite, which has no negative effects on the soil or plants, and stainless steel, which, although it would release ferric ions, does not affect plants if the soil pH remains above 4 (Pantoja et al., 2025).

Conclusions

The application of a moderate-intensity electric field ($0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$) improved the germination of native Palomero Toluqueño maize by increasing both the rate and speed of germination, which promoted emergence and early plant growth. In addition, electroculture enhanced root development and biomass production while maintaining favorable soil physicochemical conditions under the experimental conditions evaluated.

The results support the potential of electroculture as an environmentally friendly strategy for sustainable crop production. Although further studies are needed to optimize treatment conditions for different crops and soil types, the findings provide a useful reference for the application of electroculture in the conservation and production of native maize varieties.

pudo contribuir al mayor crecimiento aéreo observado en los tratamientos de electrocultivo (Cuadro 2).

Los valores de CE obtenidos (Cuadro 3) coincidían con los publicados por Acuña et al. (2022). Según la norma NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002), los valores de CE inferiores a $1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ indican que los efectos de la salinidad sobre el suelo son insignificantes. Por lo tanto, los tratamientos de electrocultivo no favorecieron la acumulación de sal asociada a los procesos electroquímicos generados por los campos eléctricos aplicados.

El contenido de MO del suelo del testigo era bajo; aunque se observó un ligero aumento en los tratamientos de electrocultivo (Cuadro 3), no se detectaron diferencias significativas ($p > 0.05$). Por otra parte, la DA disminuyó ligeramente en los tratamientos con aplicación de campos eléctricos, lo que indica que el suelo mantuvo una textura fina sin signos de compactación. En consecuencia, los tratamientos no afectaron negativamente la capacidad de retención de humedad del suelo, característica importante para el establecimiento y el desarrollo de los cultivos (Cid-Lazo et al., 2021).

Los valores de CIC (Tabla 3) indican que el suelo tenía una elevada capacidad de retención de nutrientes. Según la norma NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002), los valores de CIC entre 24 y $40 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ se clasifican como altos y se asocian a suelos con buena fertilidad debido a su capacidad para retener y aportar nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, las concentraciones de Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y P fueron bajas en los tres tratamientos. Del mismo modo, el contenido de NTK se clasificó como bajo en todos los tratamientos (DOF, 2002). Aunque solo el Ca^{2+} y el P mostraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Cuadro 3), los cambios observados sugieren que el electrocultivo podría influir en la disponibilidad de nutrientes bajo las condiciones evaluadas.

La textura del suelo se clasificó como franco, lo que sugiere condiciones favorables para la producción agrícola debido a sus proporciones equilibradas de limo y arcilla, que favorecen la retención de agua y la aireación. Esta clasificación concuerda con los valores de DA obtenidos (Cuadro 3), lo que confirma que los tratamientos de electrocultivo no afectaron negativamente la calidad física del suelo. Estos resultados indican que la aplicación de campos eléctricos, además de mejorar la disponibilidad de nutrientes, mantiene las condiciones fisicoquímicas adecuadas para el crecimiento de las plantas. No obstante, es necesario realizar más estudios para comprender los mecanismos que subyacen al electrocultivo y evaluar su eficacia en diferentes suelos agrícolas y sistemas de cultivo.

Acknowledgements

The authors would like to thank the *Universidad Autónoma del Estado de México* and the *Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS UAEM-UNAM)* for their support in conducting this research. We also thank *Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT)* and *Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT)* for the financial support granted to Elvira Gutiérrez-Bonilla for this project.

Declaration of conflicting interests

The authors declare that we have no known financial conflicts of interest or personal relationships that could have influenced the work presented in this article.

Declaration of use of artificial intelligence (AI)

The authors declare that we have not used generative AI or AI-assisted technologies for the development of this contribution.

End of English version

References / Referencias

- Acosta-Santoyo, G., Alhelí-Herrada, R., de Folter, S., & Bustos, E. (2018). Stimulation of the germination and growth of different plant species using an electric field treatment with $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5/\text{Ti}$ electrodes. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 93(5), 1488-1494. <https://doi.org/10.1002/jctb.5517>
- Acosta-Santoyo, G., Cameselle, G., & Bustos, E. (2017). Electrokinetic-enhanced ryegrass cultures in soils polluted with organic and inorganic compounds. *Environmental Research*, 158, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.06.004>
- Acosta-Santoyo, G., Solís, S., Hernández-Silva, G., Cárdenas, J., Plank, Z., & Bustos, E. (2019). Analysis of the biological recovery of soils contaminated with hydrocarbons using an electrokinetic treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 371, 625-633. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.015>
- Acuña, J., Acosta-Santoyo, G., Solís, S., Manríquez, J., & Bustos, E. (2022). Influence of the electrical stimulation using $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5/\text{Ti}$ and $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5/\text{Ti}$ anodes in the edaphological properties for the germination and growth of *Zea mays* L. In: Arora, S., Kumar, A., Ogita, S., & Yau, Y. Y. (Eds), *Innovations in Environmental Biotechnology* (pp. 907-927). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4445-0_39
- Barman, P., & Bhattacharya, R. (2016). Impact of electric and magnetic field exposure on young plants-a review. *International Journal of Current Research and Academic Review*, 4(2), 182-192. <http://doi.org/10.20546/ijcrar.2016.402.023>
- Bautista-Ramírez, E., Cuevas-Sánchez, J. A., Santacruz-Varela, A., Hernández-Leal, E., Hernández-Galeno, C. A., Hernández-Bautista, A., & Gómez-Maldonado, R. (2018). Conditioning
- Además de la intensidad del campo eléctrico, la elección del material de los electrodos es un factor importante que influye en el desempeño de los sistemas de electrocultivo. En concreto, el ánodo debe ser de un material químicamente estable, capaz de mantener una conductividad eléctrica adecuada y, al mismo tiempo, minimizar la liberación de iones potencialmente nocivos en la solución del suelo. Por este motivo, se optó por el titanio platinado, ya que su elevada estabilidad electroquímica permite una transferencia eficiente de la corriente sin aumentar la concentración de iones tóxicos que pudieran afectar negativamente la calidad del suelo o el desarrollo de las plantas (Acosta-Santoyo et al., 2019). No obstante, es importante evaluar la influencia de otros materiales económicos para electrodos, como el grafito, que no tiene efectos negativos sobre el suelo ni las plantas, y el acero inoxidable, que, aunque liberaría iones férricos, no afecta a las plantas si el pH del suelo se mantiene por encima de 4 (Pantoja et al., 2025).

Conclusiones

La aplicación de un campo eléctrico de intensidad moderada ($0.4 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$) mejoró la germinación del maíz autóctono Palomero Toluqueño, al aumentar tanto la tasa como la velocidad de germinación, lo que favoreció la emergencia y el crecimiento inicial de las plantas. Asimismo, el electrocultivo favoreció el desarrollo radicular y la producción de biomasa, al tiempo que mantuvo favorables las características fisicoquímicas del suelo bajo las condiciones evaluadas.

Los resultados respaldan el potencial del electrocultivo como estrategia respetuosa con el medio ambiente para la producción sostenible de cultivos. Aunque es necesario realizar más estudios para optimizar las condiciones de tratamiento para diferentes cultivos y tipos de suelo, los resultados constituyen una referencia útil para la aplicación de campos eléctricos en la conservación y la producción de variedades autóctonas de maíz.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a la Universidad Autónoma del Estado de México y al Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS UAEM-UNAM) por su apoyo en la realización de esta investigación. También agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) y al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECyT) por el apoyo económico otorgado a Elvira Gutiérrez-Bonilla para este proyecto.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaramos que no tenemos ningún conflicto de intereses económicos ni relaciones personales de las que tengamos conocimiento que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

- factors in the distribution of palomero toluqueño maize and alternatives for its conservation. *Revista Bio Ciencias*, 5(3), e476. <http://doi.org/10.15741/revbio.05.03.03>
- Bautista-Ramírez, E., Salinas-Moreno, Y., Santracruz-Varela, A., Córdova-Téllez, L., & López-Sánchez, H. (2019). Physical and chemical characteristics of the Palomero Toluqueño maize race. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(2), 441-446. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i2.1604>
- Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*, 59(1), 39-46. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-194501000-00006>
- Cid-Lazo, G., López-Seijas, T., Herrera-Puebla, J., & González-Robaina, F. (2021). Variación de la densidad aparente para diferentes contenidos de agua en suelos cubanos. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(2), 3-9. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=586266250001>
- Concepcion, R., Izzo, L. G., Cuello, J., Sybingco, E., & Dadios, E. (2021). Stimulation of static electric field and exposure time on germination and stem tissues of hybrid Philippine *Zea mays* genotypes. *IEEE 13th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/HNICEM54116.2021.9731933>
- Crandall, B. S., Harland-Dunaway, M., Jinkerson, R. E., & Jiao, F. (2024). Electro-agriculture: Revolutionizing farming for a sustainable future. *Joule*, 8(11), 2974-2991. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.09.011>
- Dannehl, D. (2018). Effects of electricity on plant responses. *Scientia Horticulturae*, 234, 382-392. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.007>
- Delgado-Ramírez, G., Bolaños-González, M. A., Quevedo-Nolasco, A., López-Pérez, A., & Estrada-Ávalos, J. (2023). Estimating the crop coefficient of forage maize using remote sensing. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 15(1), 17-35. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2022.09.075>
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y calificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Ercan, I., Tombuloglu, H., Alqahtani, N., Alotaibi, B., Bamhrez, M., Alshumrani, R., Ozcelik, S., & Kayed, T. S. (2022). Magnetic field effects on the magnetic properties, germination, chlorophyll fluorescence, and nutrient content of barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 170, 36-48. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.11.033>
- 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 Regulation*, 37(3), 263-285. <https://doi.org/10.1023/A:1020835304842>
- Granados-Laudino, D. (2020). El turismo rural como estrategia para el desarrollo local: el maíz palomero toluqueño (*Zea mays* Everta) de Chotejé, San Felipe del Progreso. *Revista Legislativa de Estudios Sociales y de Opinión Pública*, 13(29), 153-190. <https://biblat.unam.mx/hevila/Revistalegislativadeestudiossocialesydeopinionpublica/2020/vol13/no29/5.pdf>
- Declaración sobre el uso de la inteligencia artificial (IA)**
- Los autores declaramos que no hemos utilizado IA generativa ni tecnologías asistidas por IA para la elaboración de este artículo.
- Fin de la versión en español**
- Guderjan, M., Topfl, S., Angersbach, A., & Knorr, D. (2005). Impact of pulsed electric field treatment on the recovery and quality of plant oils. *Journal of Food Engineering*, 67, 281-287. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.029>
- Karcz, W., & Burdach, Z. (2022). The effect of DC electric field on the elongation growth, proton extrusion and membrane potential of *Zea mays* L. coleoptile cells; a laboratory study. *BMC Plant Biology*, 22, 389. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03778-4>
- Lee, S., & Oh, M. (2021). Electric stimulation promotes growth, mineral uptake, and antioxidant accumulation in kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*). *Bioelectrochemistry*, 138, 107727. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2020.107727>
- Ma, H., Wang, L., Ke, H., Zhou, W., Jiang, C., Jiang, M., Zhan, F., & Li, T. (2024). Effects, physiological response and mechanism of plant under electric field application. *Scientia Horticulturae*, 329, 112992. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112992>
- Mamlic, Z., Maksimovic, I., Canak, P., Mamlic, G., Djukic, V., Vasiljevic, S., & Dozet, G. (2021). The use of electrostatic field to improve soybean seed germination in organic production. *Agronomy*, 11(8), 1473. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081473>
- Mohd, N. A., Gomes, C., Kuen, C. P., Kadir, Z., & Gomes, A. (2018). Electrical stimulation for the growth of plants: with special attention to the effects of nearby lightning on mushrooms. *Asian Journal of Microbiology Biotechnology and Environmental Sciences*, 20(4), 1332-1343. <https://www.researchgate.net/publication/332709183>
- Morales, C., Solís, S., Bacame, F. J., Reyes-Vidal, M. Y., Manríquez, J., & Bustos, E. (2021). Electrical stimulation of *Cucumis sativus* germination and growth using IrO₂-Ta₂O₅/Ti anodes in Vertisol pelic. *Applied Soil Ecology*, 161, 103864. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103864>
- Mwendwa, S. (2022). Revisiting soil texture analysis: Practices towards a more accurate Bouyoucos method. *Heliyon*, 8(5), e09395. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09395>
- Pantoja, J. P., Boanares, D., Junio-Ramos, S., Gastauer, M., & Frois, C. (2025). Iron histolocalization in Amazon *canga* plants reveals phylogeny-driven adaptation strategies. *Flora*, 330, 152794. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2025.152794>
- Pérez-Ruiz, R. V., Aguilar-Toalá, J. E., Cruz-Monterrosa, R. G., Rayas-Amor, A. A., Hernández-Rodríguez, M., Camacho-Villasana, Y., & Herrera-Pérez, J. (2024). Mexican native maize: Origin, races and impact on food and gastronomy. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 37, 100978. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2024.100978>

- Purkaystha, J., Prasher, S., Afzal, M. T., Nzediegwu, C., & Dhiman, J. (2022). Wheat straw biochar amendment significantly reduces nutrient leaching and increases green pepper yield in a less fertile soil. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102655. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102655>
- Sîngeorzan, S. M., Holonec, L., Truta, A. M., Morar, I. M., Dan, C., Colisar, A., Viman, O., Negrusier, C., Borsai, O., Criveanu, H., Vlasin, H. D., & Păcurar, I. (2022). The influence of physical treatments on seed germination and seedling development of spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Forests*, 13(9), 1498. <http://doi.org/10.3390/f13091498>
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <http://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Xu, L., Dai, H., Skuza, L., & Wei, S. (2022). The effects of different electrode materials on seed germination of *Solanum nigrum* L. and its Cd accumulation in soil. *Journal of Environmental Sciences*, 113, 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.06.022>
- Xu, Y., Li, Y., Yu, Z., Jin, J., Zhang, C., Bao, W., Zhang, X., Wang, G., & Liu, X. (2025). Roles of soil organic acids and base cations in Mollisol acidification during the peak growth stage of crops. *Soil and Tillage Research*, 254, 106726. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106726>
- Yao, W., & Shen, Y. (2015). Effect of magnetic treatment on seed germination of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). *Scandinavian Journal of Forest Research*, 30(8), 639-642 <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1048717>
- 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*. *Biotechnology and Bioengineering*, 88(6), 788-795. <https://doi.org/10.1002/bit.20266>