



# DOCINADE

Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo

Énfasis en Sistemas de Producción Agrícola

Tesis de Doctorado

## **Efecto de campos electromagnéticos inducidos a baja intensidad sobre procesos morfo-fisiológicos y de productividad de *Zea mays* L. var Porva, como alternativa tecnológica sostenible para la producción agrícola**

**Deivis Suárez Rivero**

**Dr. Tomas J. Guzmán Hernández**

Director de Tesis

**Dr. Eduardo F. Héctor Ardisana**

Asesor de Tesis

**Dr. Jesús A. Galvis Vanegas**

Asesor de Tesis

Bogotá, Colombia, 2023

## MIEMBROS DEL TRIBUNAL EXAMINADOR

Dr. Teodolito Guillén Girón  
Dirección de Posgrados TEC

Dr. David Valverde Barquero  
Coordinador general DOCINADE

Dr. Tomas J. Guzmán Hernández  
Director de tesis

Dr. Eduardo F. Héctor Ardisana  
Miembro del Comité Asesor



Dr. Jesús A. Galvis Vanegas  
Miembro del Comité Asesor

## Tabla de contenidos

ÍNDICE DE FIGURAS.....	6
ÍNDICE DE TABLAS .....	8
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD .....	9
AGRADECIMIENTOS.....	10
DEDICATORIA.....	11
GLOSARIO DE ABREVIATURAS.....	12
RESUMEN.....	14
ABSTRACT .....	16
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>18</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>20</b>
2.1. MEJORAMIENTO DE LAS SEMILLAS.....	20
2.2. CAMPOS MAGNÉTICOS (CM).....	21
2.3. EL MAGNETISMO EN LA AGRICULTURA .....	23
2.4. EL MAGNETISMO Y LAS PLANTAS .....	24
2.5. APLICACIÓN DE CAMPOS MAGNÉTICOS EN CULTIVOS .....	25
2.6. MAÍZ ( <i>ZEA MAYS</i> L. VAR. PORVA) .....	27
2.6.1. <i>Clasificación taxonómica</i> .....	28
2.6.2. <i>Condiciones para su cultivo</i> .....	28
2.6.3. <i>Estructura morfológica y anatómica del maíz (<i>Zea mays</i> L.)</i> .....	29
2.6.4. <i>Características químicas del grano de maíz</i> .....	30
2.7. EL ALMIDÓN .....	31
2.7.1. <i>Composición química del almidón</i> .....	32
2.7.2. <i>Amilosa</i> .....	32
2.7.3. <i>Amilopectina</i> .....	32
2.7.4. <i>Estructuras cristalinas</i> .....	33
2.7.5. <i>Aislamiento del almidón</i> .....	33
2.7.6. <i>Caracterización fisicoquímica y morfológica del almidón del almidón</i> .....	34
<b>3. OBJETIVOS .....</b>	<b>35</b>
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	35

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	35
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>36</b>
4.1. UBICACIÓN EN TIEMPO Y ESPACIO.....	36
4.2. MATERIAL VEGETAL Y SU ACONDICIONAMIENTO .....	36
4.3. INDUCCIÓN DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS DE BAJA INTENSIDAD SOBRE SEMILLAS.....	36
4.4. ESTABLECIMIENTO EN CONDICIONES DE CAMPO DEL CULTIVO.....	39
4.5. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS SOBRE EL PROCESO DE GERMINACIÓN .....	40
4.6. ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS SOBRE LA SÍNTESIS DE PIGMENTOS.....	41
4.7. EFECTOS SOBRE LAS VARIABLES DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO ANTE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE BAJA INTENSIDAD .....	41
4.8. EFECTOS SOBRE LAS VARIABLES DE PRODUCTIVIDAD (RENDIMIENTO Y CALIDAD) ANTE LA INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA DE BAJA INTENSIDAD .....	43
4.9. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	44
4.9.1. Hipótesis.....	45
4.9.2. Variables.....	45
4.9.3. Factores.....	45
4.10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	46
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>47</b>
5.1. EFECTO DE LOS CEM INDUCIDOS SOBRE EL PROCESO DE GERMINACIÓN .....	47
5.2. INCIDENCIA DE LOS CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS SOBRE LA SÍNTESIS DE PIGMENTOS.....	55
5.3. EFECTOS SOBRE LAS VARIABLES DE CRECIMIENTO Y DESARROLLO DEL CULTIVO .....	59
5.4. EFECTOS SOBRE LA PRODUCTIVIDAD (RENDIMIENTO Y CALIDAD) DEL CULTIVO .....	62
5.4.1. Análisis de componentes de la productividad en torno al rendimiento ....	62
5.4.2. Caracterización del almidón .....	65
a) Morfología del grano de almidón.....	65
b) Espectroscopía de Infrarrojo del almidón (FT - IR) .....	70
c) Perfil de viscosidad .....	72

d) Caracterización estructural mediante análisis cristalográfico por difracción de rayos X .....	74
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>77</b>
<b>7. REFERENCIAS .....</b>	<b>81</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Cultivo de maíz ubicado en la Fundación Universitaria Agraria de Colombia (cultivo de semillas tratadas con CEM).	27
Figura 2. Anatomía del grano de maíz	30
Figura 3. Estructura química de la amilosa.	32
Figura 4. Estructura química de la amilopectina.	33
Figura 5. Montaje de campos electromagnéticos.	38
Figura 6. Medición del campo electromagnético con uso de sensor de CEM.	38
Figura 7. Simulación de la distribución espacial de B con el uso corriente continua (a. bobina de 1000 espiras, b. bobina de 2000 espiras y c. bobina de 3000 espiras. La línea negra indica la posición donde se colocó el material biológico para el tratamiento electromagnético.	39
Figura 8. Porcentaje de germinación.	48
Figura 9. Germinación diaria o absoluta.	49
Figura 10. Dinámica de germinación en el tiempo o germinación acumulada.	49
Figura 11. Longitud de la raíz más desarrollada del sistema fascicular ( $p < 0,01$ ).	50
Figura 12. Longitud de la parte aérea ( $p < 0,01$ ).	51
Figura 13. Masa fresca de la raíz ( $p < 0,01$ ).	52
Figura 14. Masa seca de la raíz ( $p < 0,01$ ).	53
Figura 15. Masa fresca aérea ( $p < 0,01$ ).	54
Figura 16. Masa seca aérea ( $p < 0,01$ ).	54
Figura 17. Comportamiento del contenido de Clorofila A en dos momentos. (La figura a se corresponde con el momento 1 y la figura b se corresponde al momento 2, ambas con barras de error de 95% IC).	56
Figura 18. Comportamiento del contenido de Clorofila B en dos momentos. (La figura a se corresponde con el momento 1 y la figura b se corresponde al momento 2, ambas con barras de error de 95% IC).	57
Figura 19. Comportamiento del contenido de Clorofila Total en dos momentos. (La figura a se corresponde con el momento 1 y la figura b se corresponde al momento 2, ambas con barras de error de 95% IC).	58

Figura 20. Imágenes por MEB de almidones de maíz de la variedad Porva procedentes de plantas tratadas con CEM. a y b: Control; c y d: tratamiento T1; e y f: tratamiento T2.	66
Figura 21. Imágenes por MEB de almidones de maíz de la variedad Porva procedentes de plantas tratadas con CEM. a y b: tratamiento T3; c y d: tratamiento T4; e y f: tratamiento T5.	67
Figura 22. Imágenes por MEB de almidones de maíz de la variedad Porva procedentes de plantas tratadas con CEM. a y b: tratamiento T6; c y d: tratamiento T7; e y f: tratamiento T8.	68
Figura 23. Imágenes por MEB de almidones de maíz de la variedad Porva procedentes de plantas tratadas con CEM. a y b: tratamiento T9; c y d: tratamiento T10; e y f: tratamiento T11.	69
Figura 24. Imágenes por MEB de almidones de maíz de la variedad Porva procedentes de plantas tratadas con CEM. a y b: tratamiento T12.	70
Figura 25. Espectros FT - IR de almidón de plantas tratadas con campos electromagnéticos y de control.	71
Figura 26. Perfil de viscosidad aparente.	73
Figura 27. Patrón de rayos X de almidones aislados para el control y los tratamientos.	75

## Índice de tablas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de métodos de mejoramiento semillas.	20
Tabla 2. Cuadro resumen de comportamiento de semillas influenciadas por una intensidad de campo magnético alto o bajo.	26
Tabla 3 Clasificación taxonómica del maíz.	28
Tabla 4. Composición química proximal de las partes principales de los granos de maíz (%).	31
Tabla 5. Índices fisiológicos empleados.	42
Tabla 6. Interacciones en el diseño experimental.	46
Tabla 7. Indicadores fisiológicos calculados como medida del desarrollo vegetal.	61
Tabla 8. Características de la mazorca y rendimiento del cultivo.	64

## Declaración de autenticidad

Yo, Deivis Suárez Rivero, estudiante del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo, declaro que la Tesis Doctoral que presento para su exposición y defensa titulada “*Efecto de campos electromagnéticos inducidos a baja intensidad sobre procesos morfo-fisiológicos y de productividad de Zea mays L. var Porva, como alternativa tecnológica sostenible para la producción agrícola*” y comité asesor de tesis son el Dr. Tomas J. Guzmán Hernández (director de tesis), Dr. Eduardo F. Héctor Ardisana (asesor) y el Dr. Jesús A. Galvis Vanegas (asesor), es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo. Este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Bogotá, Colombia a 16 de noviembre de 2022.

Deivis Suárez Rivero

## Agradecimientos

A la Fundación Universitaria Agraria de Colombia – UNIAGRARIA, por permitir desarrollar gran parte de este proyecto dentro de sus instalaciones, tanto en áreas de producción como espacios de laboratorios, aun cuando la pandemia del COVID 19 estaba en estado crítico.

Al Dr. Tomás de Jesús Guzmán Hernández, quien ha sido el tutor principal para el desarrollo del proyecto; en este sentido un agradecimiento especial por aportar sus conocimientos, brindarme en todo momento su apoyo, confianza y permanente disponibilidad para hacer posible la realización de este.

A los doctores Eduardo Fidel Héctor Ardisana y Jesús Antonio Galvis, quienes de forma maravillosa codirigieron este proyecto y a quienes agradezco el apoyo incondicional desde el inicio, por el tiempo invertido y las sugerencias que tributaron a la mejora continua del proyecto.

De igual manera quiero expresar un agradecimiento especial al Dr. Leonardo Alonso Gómez, quien, desde la dirección de la pasantía, contribuyó positivamente a la formación de competencias relacionadas con el proyecto.

Al Dr. Mario E. Rodríguez García y al Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada – CFATA, perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) sede Querétaro, por permitirme adquirir competencias en tecnologías avanzadas en el marco de la pasantía y así fortalecer los resultados de este proyecto de tesis.

A su vez quiero agradecer a todo el cuerpo docente y administrativo del DOCINADE, por el conocimiento aportado en el proceso formativo y actividades complementarias.

De forma general, a mis compañeros de la Cohorte 2019 del DOCINADE por la experiencia vivida dentro del programa, intercambio de conocimiento y cultural.

A mi equipo de trabajo y en especial a Olga Marín Mahecha y Jannet Ortiz Aguilar, quienes en todo momento tuvieron la disposición de colaborar durante las diferentes fases del proyecto.

En fin, a todas las personas que de alguna manera me acompañaron durante este proceso.

## Dedicatoria

A Dios, todo poderoso y a la santísima Virgen de la Caridad del Cobre, por guiarme espiritualmente a lo largo de toda la vida.

A mi madre, Violeta Rivero Pérez y mi hermano Maikel Suárez Rivero, quienes han sido motivo de inspiración y causantes de que siempre me coloque metas más altas.

A mi padre, Osmundo Suárez Mejía, quien desde el cielo me observa y cuando duermo susurra a mi oído cuan orgulloso se siente de mí.

A mis tíos Mercedes Rivero Pérez y Luis Pérez Roldán, quienes me han enseñado que, en la vida, cuando nos sacrificamos para lograr las metas, la victoria sabe mejor.

A Patrick R. Pomerlow II, quien ha sido un apoyo incondicional en todo el sentido de la palabra, emocional, económico y formativo, pues siempre ha buscado los detalles que se me escapan, aun en la historia, permitiéndome formarme de forma integral.

A toda mi familia y amigos, a quienes de una u otra forma he privado de mi presencia por estar trabajando en mi proyecto de investigación, pero que aun así me han enviado la mejor energía del universo.

A mi amigo y hermano, Juan Fuentes Reines, quien fuera compañero de estudio del DOCINADE los primeros semestres y que por motivos de salud se retiró; aun así, siempre ha estado ahí aconsejándome en el desarrollo de cada uno de los procesos llevados a cabo y motivándome en los momentos más difíciles.

## Glosario de abreviaturas

%G: Porcentaje de germinación

$\mu$ T: Micro tesla

A: Absorbancia

AFE: Área Foliar Específica

C: Control

CEM: Campo electromagnético

CM: Campo magnético

CMP: Campos Magnéticos Permanentes

DAF: Duración del Área Foliar

FE - IR: Espectroscopía de Infrarrojo por transformación de Fourier

G: Gauss

IAF: Índice de Área Foliar

MEB: Microscopía electrónica de barrido

MF: Masa fresca

MS: Masa seca

NH: Número de hileras por mazorca

nT: Nano Tesla

PA: Peso de mazorca con amero

PGr: Peso de los granos por mazorca

PT: Peso de la tusa

RVA: *Rapid Visco Analyser*

SEM: *Scanning Electron Microscopy*

SI: Sistema Internacional de Unidades

T: Tesla

T1: Intensidad del CEM 23  $\mu$ T durante 60 minutos

T10: Intensidad del CEM 118  $\mu$ T durante 180 minutos

T11: Intensidad del CEM 118  $\mu$ T durante 300 minutos

T12: Intensidad del CEM 70  $\mu$ T con tiempo de exposición permanente

T2: Intensidad del CEM 23  $\mu$ T durante 180 minutos

T3: Intensidad del CEM 23  $\mu$ T durante 300 minutos  
T4: Intensidad del CEM 23  $\mu$ T con tiempo de exposición permanente  
T5: Intensidad del CEM 70  $\mu$ T durante 60 minutos  
T6: Intensidad del CEM 70  $\mu$ T durante 180 minutos  
T7: Intensidad del CEM 70  $\mu$ T durante 300 minutos  
T8: Intensidad del CEM 70  $\mu$ T con tiempo de exposición permanente  
T9: Intensidad del CEM 118  $\mu$ T durante 60 minutos  
TAC: Tasa Absoluta de Crecimiento  
TAN: Tasa de Asimilación Neta  
TCC: Tasa de Crecimiento del Cultivo  
TCC: Tasa de Crecimiento Relativo  
Var.: Variedad

## Resumen

Al analizar la problemática del sector primario agrícola, se puede observar que la calidad de las semillas botánicas como material de propagación se convierte en una limitante productiva. Uno de los principales problemas que se registra en la literatura especializada en materia de propagación por semilla botánica es la dormancia seminal, lo que impacta al agricultor en el momento de siembra, puesto que tendrá que utilizar más semillas para la misma superficie o tendrá menor número de plantas por unidad de superficie. En el anterior contexto, este proyecto buscó evaluar el efecto que generan los campos electromagnéticos inducidos sobre las variables de crecimiento, desarrollo y productividad de plantas de *Zea mays* L. var Porva como alternativa tecnológica sostenible para la producción agrícola de este cultivo. Para ello, las semillas se sometieron, previo a la siembra, a tres intensidades de campo electromagnético (23, 70 y 118  $\mu\text{T}$ ) con cuatro tiempos de exposición (1, 3 y 5 horas diarias por 15 días y exposición permanente durante los 15 días), dejando un grupo control sin exposición a campos electromagnéticos. Se analizaron variables relacionadas con el proceso de germinación, entre ellas el porcentaje de germinación, la germinación diaria y acumulada, altura (cm), longitud de la raíz (cm), masa fresca aérea y de la raíz (g), así como masa seca aérea y de las raíces (g). Las variables anteriormente mencionadas se determinaron en dos momentos, exceptúan las relacionadas a la germinación, para determinar indicadores fisiológicos que describen el desarrollo del cultivo (Tasa de Crecimiento Relativo – TCR, Tasa de Asimilación Neta – TAN, Índice de Área Foliar – IAF, Tasa de Crecimiento de Cultivo – TCC, Tasa Absoluta de Crecimiento – TAC, Duración de Área Foliar – DAF y Área Foliar Especifica - AFE). Por otra parte, con la finalidad de caracterizar la producción, se evaluaron las características morfológicas de la mazorca y frutos (peso de la mazorca con amero, peso de tusa, peso de frutos y número de hileras), así mismo se extrajo el almidón del maíz para su caracterización por Microscopia Electrónica de Barrido, análisis cristalográfico por difracción de Rayos X, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y Viscosidad Aparente. Se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk y de Levene, esta última para establecer la homogeneidad de la varianza y así proceder al ANOVA. Finalmente se realizaron pruebas de rangos múltiples para establecer el comportamiento de las variables en comparación con el control. En todos los casos se empleó el software SPSS. En el anterior contexto experimental

se evidencia que el proceso de germinación se vio estimulado por la aplicación de los campos electromagnéticos a intensidad media (70  $\mu$ T), pero a sus más altos tiempos de exposición (300' y Permanente durante 15 días), presentándose una conducta similar para germinación diaria, dinámica de germinación, longitud de la raíz y altura de la planta, similar a lo ocurrido la síntesis de pigmentos, biomasa fresca y seca, con exposición a 70  $\mu$ T por 180', con su consiguiente reflejo en los indicadores fisiológicos evaluados, difiriendo siempre del control. Por otra parte, en materia de rendimiento del cultivo, los análisis estadísticos reflejan un mejor comportamiento de todas las variables analizadas para la exposición a 118  $\mu$ T por 300' y Permanente durante 15 días, difiriendo significativamente en la mayoría de las variables que componen este. Así mismo, en materia de variables de calidad del almidón extraído del maíz, es de resaltar que esta no se vio afectada al ser comparada con el control para ninguno de las pruebas efectuadas.

**Palabras claves:** Morfología, almidón, bioproceso, agroindustria, aislamiento, electromagnetismo, germinación.

## Abstract

When analyzing the problems of the primary agricultural sector, it can be observed that the quality of botanical seeds as propagation material becomes a productive constraint. One of the main problems reported in the specialized literature on botanical seed propagation is seed dormancy, which impacts the farmer at the time of planting, since he will have to use more seeds for the same area or will have fewer plants per unit area. In this context, this project sought to evaluate the effect of induced electromagnetic fields on the growth, development, and productivity variables of *Zea mays* L. var Porva plants as a sustainable technological alternative for the agricultural production of this crop. For this purpose, seeds were subjected, prior to sowing, to three electromagnetic field intensities (23, 70 and 118  $\mu\text{T}$ ) with four exposure times (1, 3 and 5 hours daily for 15 days and permanent exposure during the 15 days), leaving a control group without exposure to electromagnetic fields. Variables related to the germination process were analyzed, including germination percentage, daily and cumulative germination, height (cm), root length (cm), aerial and root fresh mass (g), as well as aerial and root dry mass (g). The variables were determined at two moments, except those related to germination, to determine physiological indicators that describe the development of the crop (Relative Growth Rate - RGR, Net Assimilation Rate - NAR, Leaf Area Index - LAI, Crop Growth Rate - CGR, Absolute Growth Rate - AGR, Leaf Area Duration - LAD and Specific Leaf Area - SFA). On the other hand, in order to characterize the production, the morphological characteristics of the ear and fruits were evaluated (weight of the ear with *amero*, weight of the cassava, weight of fruits and number of rows), likewise the starch of the corn was extracted for its characterization by Scanning Electron Microscopy, crystallographic analysis by X-Ray diffraction, Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) and Apparent Viscosity. The Shapiro-Wilk and Levene normality tests were performed, the latter to establish homogeneity of variance and thus proceed to ANOVA. Finally, multiple range tests were performed to establish the behavior of the variables in comparison with the control. SPSS software was used in all cases. In the above experimental context, it is evident that the germination process was stimulated by the application of electromagnetic fields at medium intensity (70  $\mu\text{T}$ ), but at their highest exposure times (300' and Permanent for 15 days), presenting a similar behavior for daily germination, germination

dynamics, root length and plant height, similar to what occurred for pigment synthesis, fresh and dry biomass, with exposure to 70  $\mu$ T for 180', with its consequent reflection in the physiological indicators evaluated, always differing from the control. On the other hand, in terms of crop yield, the statistical analyses reflect a better performance of all the variables analyzed for exposure to 118  $\mu$ T by 300' and Permanent for 15 days, differing significantly in most of the variables that compose it. Likewise, in terms of the quality variables of the starch extracted from corn, it should be noted that it was not affected when compared with the control for any of the tests performed.

**Key words:** Morphology, starch, bioprocess, agroindustry, isolation, electromagnetism, germination.

## 1. Introducción

Hoy en día es una realidad que los agricultores se encuentran con semillas botánicas de un poder germinativo reducido, lo que se traduce en empleo de mayor volumen de estas por unidad de superficie o en su defecto una disminución del número de plantas, esto en gran medida profundizado por el debilitamiento del campo magnético de la tierra y el papel que este juega en la dinámica funcional de los seres y sistemas vivos (Ortiz-Aguilar, et al., 2015). Es por esto por lo que surge el interés en buscar métodos alternativos que permitan estimular los embriones de las semillas con baja viabilidad para de esta forma se incremente la germinación e induzca cierta resistencia a los factores exógenos que limitan su desarrollo (factores manifiestos en el cambio climático) (Agüero, Pereyra y Rolando, 2017).

Partiendo de la premisa de las fluctuaciones del campo magnético de la tierra (Molina-Cardín, 2019) y de las consecuencias que esto trae sobre los procesos fisiológicos que se desarrollan naturalmente en los seres vivos en general y en lo particular en las plantas, se hace necesario reestablecer este de forma artificial (Carbonell, et al., 2017). Este proceso puede realizarse mediante el empleo campos electromagnéticos inducidos a baja intensidad, para que las células puedan expresar, al menos en teoría, todo su potencial biológico, ya sea por repolarización celular o estimulación cromosómica (Torres, Díaz y Cabal, 2008). Es así como, para un pequeño, mediano o gran productor, contar con semillas botánicas de calidad ha sido siempre un factor determinante a la hora de esperar buenos rendimientos agrícolas (Hincapie, et al., 2010). Evidentemente, no se puede descartar que la disminución del poder germinativo de la semilla botánica que se presenta en ocasiones puede estar asociada a diferentes factores del producto y del medio que lo rodea, entre los que se encuentra un mal manejo postcosecha (Ortega-Martínez, et al., 2010). Por ello, es urgente la búsqueda de métodos o tecnologías que permitan mejorar la calidad de la semilla botánica, lo que se convierte en un reto de vital importancia teniendo en cuenta que este tipo de material biológico es propenso a la pérdida de vigor y viabilidad durante el almacenamiento prolongado.

Por otra parte, es de señalar que por mucho tiempo los efectos negativos antes mencionados han sido mitigados mediante el uso de cruzamientos genéticos, hibridación, clonación, así como el tratamiento químico y fitohormonal del material vegetal (Sánchez-Soto, et al., 2017).

Otro estudio que ha sido empleado en la actualidad se corresponde con los efectos del campo magnético sobre el material biológico, pero aún existe poca evidencia sobre el efecto de los campos eléctricos y electromagnéticos (Anaya, et al., 2015). Dichos estudios han estado encaminados a conocer como pueden ser modificados los efectos en función de los dos parámetros de exposición fundamentales: la intensidad del campo (inducción magnética) y el tiempo. Entre las primeras investigaciones sobre los efectos de este agente físico en tejidos vegetales, se encuentran los trabajos de Sawostin en 1930, quien estudió la incidencia de un campo magnético de 700 mT sobre algunos parámetros biofísicos y fisiológicos a nivel celular en (*Nitella flexilis* L.) (citados por Ortiz-Aguilar, et al., 2015).

Es así como son conocidos y aprovechados los efectos de un campo magnético aplicado a masas de líquidos o gases en movimiento o estáticas, con el objeto de obtener ciertos cambios en las propiedades físicas o químicas de estas masas. La utilización más común de estos dispositivos ha sido para la precipitación de sales y la disminución de incrustaciones en tuberías o depósitos de líquidos con cierto contenido de estas sales. Los dispositivos conocidos carecen de características de aplicación específica a los contenidos en las masas fluidas, y no tienen la intensidad que asegure su eficiencia (Joya, 2015).

## 2. Marco teórico

### 2.1. Mejoramiento de las semillas.

Se han utilizado a lo largo de los años diferentes métodos o técnicas que permitan que las semillas tengan mejores resultados en los procesos agrícolas, puesto que una semilla de alta calidad es la base de una agricultura exitosa.

A continuación, se presenta un resumen de los diferentes métodos aplicados en semillas en pro de su mejoramiento, en la tabla 1, se encontrará las ventajas y desventajas de dichas técnicas.

**Tabla 1.** Ventajas y desventajas de métodos de mejoramiento semillas

Método	Ventajas	Desventajas	Fuente
Tradicional	Es un método de bajo costo que aún en ambientes adversos puede satisfacer las necesidades del agricultor.	Producción lenta y heterogénea que en algunos casos solo llega a satisfacer necesidades de subsistencia.	(Zepeda-Bautista, et al., 2019)
Agroquímico	Altos rendimientos en menores tiempos.	Altos costos de producción, causando daños al medio ambiente por el empleo de productos químicos sintéticos y contaminan los alimentos.	(Zepeda, et al., 2011)
Genético	Incrementan la resistencia de las plantas y su productividad.	Altos costos de producción, disminución de la diversidad de especies e impactos negativos sobre el medio ambiente.	(Mahajan y Pandey, 2011) (Mahajan y Pandey, 2014)

Método	Ventajas	Desventajas	Fuente
Biofísico	Disminuyen tiempos de germinación e incrementa el porcentaje de esta, mayor ganancia en biomasa, así como mejores indicadores de crecimiento y desarrollo.	Desconocimiento de las técnicas a utilizar.	(Aladjadjiyan, 2012)

## 2.2. Campos Magnéticos (CM).

El concepto de campo magnético (CM) se puede entender como una fuerza originada por una cantidad de carga (combinación de ondas eléctricas y magnéticas) que atraviesa una superficie por unidad de tiempo y que afecta cualquier otra carga o corriente en un espacio de influencia, por lo tanto, la naturaleza fundamental del magnetismo es la interacción de cargas eléctricas en movimiento, cuanto más elevada es su frecuencia mayor es la cantidad de energía que transporta la onda (Arias-Franco, et al.,2021).

Una forma de medir este efecto es mediante la intensidad que se genera, y se representa en unidades de amperios / metro (A/M). Estas intensidades o magnitudes se relacionan con un flujo electromagnético, el cual se mide como cantidad de inducción magnética representada en Tesla (T), medida en el sistema internacional (SI), el micro tesla ( $\mu\text{T}$ ), se conforman en una fracción de este flujo magnético que se evalúa con el fin de generar estos campos electromagnéticos (Alonso - Fustel, et al., 2011). En la literatura actual, tal como se evidencia en la tabla 2, se reporta cada vez en mayor grado, diversas aplicaciones novedosas del tratamiento magnético en múltiples campos, como, por ejemplo; medicina, veterinaria, la agricultura lo cual es un indicador del futuro prometedor de esta tecnología.

Unido a lo anterior, es de señalar que el campo magnético terrestre o campo geomagnético, desde una mirada vectorial, posee sus vectores saliendo por el polo sur geográfico, es decir, por el polo norte magnético, ingresando por el polo norte geográfico o lo que es igual decir, polo sur magnético. En este orden de ideas su intensidad es mayor en los polos y se verá disminuida al acercarse a la línea ecuatorial. Lo anterior llevaron a Galland y Pazur (2005) a afirmar que el campo geomagnético es considerado estático, homogéneo y débil, con una

fuerza de 33 - 35  $\mu\text{T}$  en la región ecuatorial, mientras que en los polos es de 67 - 70  $\mu\text{T}$  (Maffei, 2014).

Otro aspecto relevante en las fuentes de campo magnético, como se señaló anteriormente, lo constituye la homogeneidad en la densidad de flujo magnético. Es así como mediante bobinas electromagnéticas se puede conseguir una alta homogeneidad, mientras que con el empleo de imanes permanentes la homogeneidad resulta ser más baja. A continuación, se presenta una breve descripción de estas fuentes:

- Bobinas de Helmholtz: están conformadas por dos bobinas circulares coaxiales con el mismo radio. Es así como el radio es considerado como la distancia entre los planos de las bobinas. En este orden de ideas, las bobinas de Helmholtz son la configuración más simple que reflejan los estudios para la generación de un campo magnético relativamente constante (Walter y Alonso, 2017). Como principio básico se tiene que cada bobina se conforma de un espiral de alambre por el que circula la corriente en la misma dirección; si las corrientes circularan en direcciones contrarias se hablaría de bobinas anti Helmholtz, y su estructura es apropiada para la generación de gradientes de campo magnético (Rivera, 2016). Ambas, las bobinas de Helmholtz y anti Helmholtz son usadas en mediciones de campo, biomedicina, procesos de calibración de sondas y sensores, entre otros (Petkovic y Radic, 2015).
- Solenoide: con este nombre se conocen a aquellos dispositivos con enrollamiento helicoidal de alambre sobre un cilindro, lo que permite tener espiras iguales y paralelas. El enrollado podrá estar conformado por un sinnúmero de vueltas (desde unas pocas hasta miles) muy apretadas, caracterizadas por conducir la misma corriente, siendo el campo magnético en cada punto visto como la suma de los campos generados por las espiras individuales (Walter y Alonso, 2017). Al centro del solenoide las líneas de fuerza del campo magnético son consideradas en paralelo, lo que indica la generación de un campo uniforme; a diferencia de lo que ocurre en el centro, en los extremos las líneas son dispersas y el campo magnético resultante es débil (Petkovic y Radic, 2015).
- Electroimán: son un par de bobinas de alambre con un número de vueltas significativas, tan unidas entre si (estrechas) que cada una está cercana a ser una espira plana circular. Un elemento de relevancia lo constituye el hecho de que, en estas bobinas para poder generar un campo magnético, se requiere de una corriente, lo que, a su vez,

con la incorporación de núcleos de hierro móviles permite el incremento del campo magnético y su confinamiento a ciertas regiones deseadas (Young y Freedman, 2009). Es este orden de ideas, el campo magnético generado dependerá de las características y de la geometría de los núcleos de hierro que se usen en su elaboración. Ejemplo de su aplicación lo constituyen los equipos de resonancia magnética nuclear usados en la obtención de imágenes (Walter y Alonso, 2017).

- Imanes permanentes: Los campos magnéticos que pueden generarse con el empleo de imanes permanentes también son ocasionados por el movimiento de las cargas, pero para este caso particular, este movimiento ocurre en la escala microscópica del átomo (Vashisth y Joshi, 2017). Dado lo anterior, la densidad de flujo magnético dependerá de la posición espacial de registro de su magnitud, presentando evidentes cambios de polaridad en la zona proximal al punto central del imán, razón por la cual el campo magnético que estos generan posee una homogeneidad variable (entre 8% a 60% en un imán de B nominal continuo, radio externo 50 mm y grosor de 20 mm) tal como demostraron Torres et al. (2018).

### **2.3. El magnetismo en la agricultura**

En los últimos años se ha potenciado la búsqueda de soluciones y métodos económicamente viables y compatibles con el ambiente, que conlleven al desarrollo sostenible de la producción agrícola, es por esta razón que se emplea la técnica de aplicación de campos electromagnéticos (CEM) sobre cultivos. Los CEM están siendo utilizados como recurso tecnológico para mejorar la calidad de las semillas, para incrementar la germinación de estas, el crecimiento y desarrollo de las plantas, el incremento del peso de los frutos y los rendimientos. Se conoce, además, que los campos electromagnéticos inducen perturbaciones en el ambiente circundante y provocan cambios morfológicos y fisiológicos. Existen un número creciente de experimentos que muestran que la exposición a los campos electromagnéticos produce una gran variedad de efectos, entre ellos una acción positiva sobre la estimulación del crecimiento y desarrollo de los tejidos vegetales (Carbonell, et al., 2017) y aumento en su producción. Cabe resaltar que para la aplicación de campos magnéticos se tiene que estudiar primero las condiciones del cultivo que requiere de esta metodología ya que no todos pueden ser abordados de la misma manera, esta tecnología se puede aplicar de las siguientes formas

teniendo en cuenta factores que condicionan el proceso: acción directa sobre el ser vivo, acción sobre el agua y acción sobre el suelo (Joya, 2015).

Los efectos primarios que se producen en el metabolismo por la aplicación del campo magnético se hacen evidentes. Algunos investigadores describen que los efectos metabólicos producidos por las radiaciones magnéticas se manifiestan como procesos tróficos estimuladores y de reparación celular (Vashisth y Nagarajan, 2010; Ursache, et al., 2009).

En las diferentes investigaciones acerca de magnetismo en la agricultura se evidencia resultados positivos puesto que este método físico no solo es rentable, sino que también mejoran significativamente el rendimiento sin afectar negativamente al medio ambiente. Influyen en el proceso fisiológico y bioquímico de las semillas y, por lo tanto, contribuyen a un mayor vigor y una mejor posición del cultivo (Vashisth y Nagarajan, 2010).

#### **2.4. El magnetismo y las plantas**

El estudio del efecto del campo magnético en los organismos biológicos, incluidas las plantas, se remonta a la segunda mitad del siglo XIX. El primer trabajo documentado a este respecto es la publicación de 1876 de J. Reinke denominada estudios sobre crecimiento que presenta los resultados de experimentos relacionados con el efecto del campo magnético en el desarrollo de las plantas (citado por Pietruszewski y Martínez, 2015), dichos estudios han demostrado que al ser aplicados campos magnéticos en las plantas se genera un incremento en la energía contenida en los cloroplastos debido a sus propiedades paramagnéticas. Esto provoca que los átomos de los cloroplastos se alineen hacia la dirección del campo magnético externo lo que consecuentemente acelera el metabolismo y la germinación por la acumulación de energía (Moussa, 2011) además aumenta el vigor de estas, con lo que las puede hacer más resistentes a plagas y a cambios de temperatura.

La aplicación de campos electromagnéticos permite un desarrollo biotecnológico y sostenible a la agricultura. El uso de campos electromagnéticos ha sido utilizado en la parte de la estimulación de procesos de germinación en semillas de tipo vegetal, estos flujos se usan magnéticos para que se genere un mayor crecimiento de plántulas con condiciones de mayor calidad (Suárez-Rivero, et al., 2016).

La influencia de este fenómeno ocurre a nivel celular; donde hay un aumento de la permeabilidad de la membrana plasmática (Barone, Duarte y Luna, 2016) y transformaciones

de células apicales dependiendo de la intensidad del campo magnético (Pietruszewski y Martínez, 2015).

## **2.5. Aplicación de campos magnéticos en cultivos**

Los tratamientos magnéticos en diferentes cultivos antes de siembra tienen un efecto en los procesos metabólicos de las plantas, en algunos casos los comportamientos se ven diferenciados por el tratamiento de campos magnéticos. El anterior efecto, reconocido por algunos autores por las características biofísicas de la membrana citoplasmática, la de orgánulos y organelos celulares. Al respecto, la membrana celular presenta el comportamiento de un capacitor dada su estructura, en la que los fosfolípidos, caracterizados por presentar una cabeza polar orientadas hacia el líquido intracelular con carga negativa y al líquido extracelular con carga positiva simulan el funcionamiento a nivel biológico de placas conductoras. En este mismo orden de ideas, es de resaltar que las cadenas hidrocarbonadas no polares se comportan como el dieléctrico permitiendo separar las cargas y tienden a mostrar una resistencia mayor a la conducción eléctrica (Rodi, 2020).

Por otra parte, la membrana estructuralmente posee canales específicos para iones de sodio y potasio, los cuales, de forma natural, por gradiente químico permiten la generación de un diferencial de potencial despolarizando (salida de 3 iones  $\text{Na}^+$ ), luego, empleando su potencial eléctrico salen los iones  $\text{K}^+$ , repolarizando la célula. Así, la diferencia entre la membrana y el capacitor radica especialmente en la forma en que se genera el potencial, siendo para la membrana inducido por los iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , entre otros, mientras que en el capacitor estará dado por el flujo continuo de electrones (Ramírez-Martín y Durán-Avenidaño, 2015).

Los campos electromagnéticos permiten la estimulación de las semillas para poder afectar los rendimientos de manera positiva en semillas de alta calidad, se han planteado investigaciones y evaluaciones con las siguientes semillas en su mayoría obteniendo valores favorables. A continuación, en la tabla 2 se relacionan algunos estudios a semillas a las que se les aplica una intensidad del campo magnético, y cuál es su respuesta a esto.

**Tabla 2.** Cuadro resumen de comportamiento de semillas influenciadas por una intensidad de campo magnético alto o bajo.

Intensidad del campo magnético		Semilla (Especie)	Comportamiento de la planta	Referencia
(Gauss)(G)	(Tesla) (T)			
2,150	0,215	Salvia y caléndula ( <i>Salvia officinalis</i> y <i>Calendula officinalis</i> )	Se aumenta el porcentaje y la tasa de germinación se aumenta el porcentaje y la tasa de germinación.	(Flórez, et al., 2012)
960	0,096	Fresa ( <i>Fragaria x ananassa</i> )	Mayor rendimiento y producción de frutos.	(Esitken y Turan, 2014)
200	0,02	Cebolla ( <i>Allium cepa</i> )	Incremento en la longitud de las raíces en el bulbo.	(Holubowicz, et al., 2014)
100	0,01	Arroz ( <i>Oriza sativa</i> )	Estimulación en la germinación.	(Mendez-Carrejo, 2013)
1,5	0,15	Garbanzo ( <i>Cicer arietinum</i> )	Aumento en la longitud y volumen radicular.	(Vashisth y Nagarajan, 2010)
1,2	0,12	Tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> )	Rápido crecimiento y mayor rendimiento productivo. Mejoramiento en el vigor de la semilla y crecimiento del brote.	(Vashisth, et al., 2013)
1.18 / 0.7 /0.23		Maíz ( <i>Zea mays</i> L.)	Incremento de la germinación, síntesis de pigmentos, crecimiento y desarrollo.	(Suárez-Rivero, et al., 2016)
1.18 / 0.7 /0.23		Girasol ( <i>Helianthus annus</i> L.)	Incremento de la germinación, síntesis de pigmentos, crecimiento y desarrollo.	(Suárez-Rivero, et al., 2017, 2018)

Se observa en todos los estudios asociados al fenómeno de campos magnéticos aplicados en la agricultura que genera algún tipo de cambio que en su mayoría aporta resultados positivos en cuanto a rendimiento y calidad de producto.

## 2.6. Maíz (*Zea mays* L. var. *Porva*)

Maíz, palabra de origen indio caribeño, significa literalmente «lo que sustenta la vida». El maíz es la planta más domesticada y evolucionada del reino vegetal (ver figura 1). El origen y la evolución del maíz es un misterio, porque ha llegado a nosotros altamente evolucionado, sin que se conozcan formas intermedias. El maíz, *Zea mays* L., es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen. Pertenece a la familia de las Poáceas (Gramíneas), tribu Maydeas, y es la única especie cultivada de este género, aunque autores como Serratos-Hernandez (2012) señalan que su centro de origen está ubicado dispersamente en América. El maíz, junto con el trigo y el arroz uno de los cereales más importantes del mundo (Romero y García, 2016), el *Zea mays* L., es utilizado por el hombre desde épocas remotas y es una de las especies vegetales más productivas, tanto en su producción global cerca de 600 millones de toneladas por año como en su productividad más de 4 t ha<sup>-1</sup>. Este suministra elementos nutritivos a los seres humanos y a los animales y es una materia prima básica de la industria de transformación, con la que se producen almidón, aceite y proteínas, bebidas alcohólicas, edulcorantes alimenticios y, desde hace poco, combustible (Romero y García, 2016).



**Figura 1.** Cultivo de maíz ubicado en la Fundación Universitaria Agraria de Colombia (cultivo de semillas tratadas con CEM).

Fuente: Propia.

### 2.6.1. Clasificación taxonómica

El maíz pertenece al reino de las plantas, es una gramínea, es decir, de la familia de las Poaceae y la especie como tal se denomina *Zea mays* L. La clasificación taxonómica del maíz fue tomada de una base de datos llamada Sistema de Información de Organismos Vivos Modificados (SIOVM, 2022) resumido en la tabla 3, la cual es un desarrollo de un proyecto mexicano en donde se encuentra información que contiene datos taxonómicos, biológicos, genéticos y ecológicos, así como aspectos geográficos de las especies relacionadas con el organismo vivo modificado y su organismo receptor no modificado.

Esta especie se caracteriza por ser uno de los primeros cultivos domesticados y base económica mundial, ya sea como alimento para los seres humanos, para el sector pecuario en fresco o procesado, así como materia prima de numerosas cadenas agroindustriales; por destacar alguna, la producción de bioetanol y de aceite de maíz suelen ser de las más reconocidas (Saini y Pradesh, 2018).

**Tabla 3.** Clasificación taxonómica del maíz (SIOVM).

Clasificación taxonómica
Reino: Plantae División: Magnoliophyta Clase: Liliopsida Subclase: Commelinidae Orden: Cyperales Familia: Poaceae Género: <i>Zea</i> Especie: <i>mays</i> L., Subespecie: <i>Mays</i>
Nombre científico: <i>Zea mays</i> L.

Es una planta monocotiledónea, anual de la familia de las gramíneas oriunda de América.

### 2.6.2. Condiciones para su cultivo

El maíz es un cultivo que tiene una amplia variabilidad genética y adaptabilidad, con una altitud de 0 a 3800 msnm; con una latitud de 40° S – 55° N. Se desarrolla de forma óptima en

regiones de clima cálido; es un cultivo de crecimiento rápido, con temperaturas de 25 a 33 °C (Pavón y Zapata, 2012).

El suelo ideal para el cultivo de maíz es de textura intermedia, de franco a franco-arcilloso. Los suelos para el maíz deben ser bien drenados y aireados, al ser este uno de los cultivos menos tolerantes a la baja difusión de aire en el suelo. El pH ideal para la siembra de maíz es de 5,5 a 7,0 existiendo fuera de estos límites problemas de toxicidad de ciertos elementos (Pavón, 2020).

Condiciones climáticas para la germinación, la temperatura media diurna mínima debería de ser no menos de 10 °C, siendo la óptima entre 18 y 20 °C. Para el crecimiento soportan temperaturas como mínimo de 15 °C y como máxima de hasta 40 °C, siendo la ideal entre 20 a 30 °C. Y para la floración necesita temperaturas que estén en promedio de 20 a 30 °C. y con días soleados y noches frías. El periodo más crítico se sitúa durante e inmediatamente después de la floración (Ortigoza, et al., 2019).

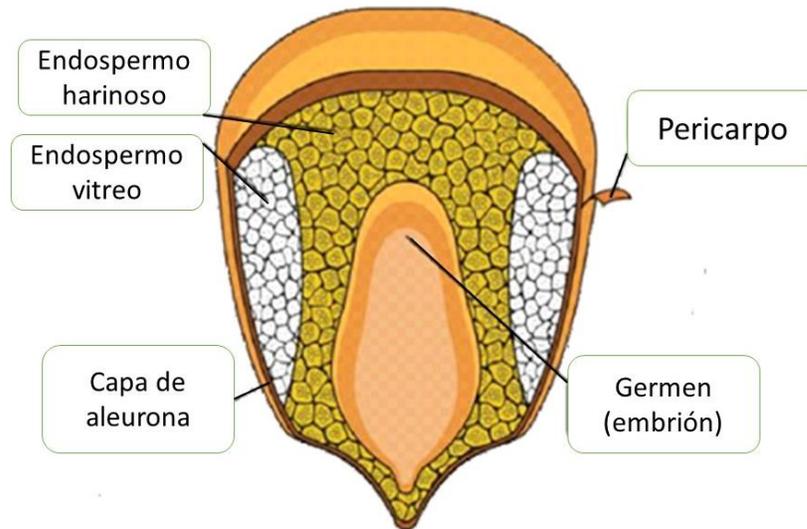
La falta de agua es el factor más limitante en la producción de maíz en las zonas tropicales y subtropicales. Cuando hay estrés hídrico o sequía durante las primeras etapas (15 a 30 días) de establecido del cultivo puede ocasionar pérdidas de plantas jóvenes, reduciendo así la densidad poblacional o estancar su crecimiento (Coronel, 2015). El agua en forma de lluvia es necesaria y benéfica ya que en ciertas ocasiones existe un control de plagas en forma natural, sobre todo cuando la planta está en el período de crecimiento. Una variedad tropical de maíz con un ciclo de cultivo de 120 días requiere aproximadamente de 600 a 700 mm de agua durante su ciclo vegetativo (Cruz, 2013).

### **2.6.3. Estructura morfológica y anatómica del maíz (*Zea mays* L.)**

La estructura morfológica y anatómica del grano de maíz (*Zea mays* L.), tal como se presenta en la figura 2, está constituida de cuatro ejes principales los cuales tienen el siguiente porcentaje de distribución ponderal son: Pericarpio 5 – 6 %, aleurona 2- 3 %, endospermo 80 – 85 %, germen 10 – 12 % (Guacho-Abarca, 2014):

- Germen o embrión: comprende la radícula, la plúmula y el escutelo. Representa el 10 % a 12 % del peso total del grano; es rico en proteínas, aceites y minerales.

- Endospermo o almidón: constituye el 80 – 85 % del peso del grano seco, su constitución determina la estructura y el valor alimenticio en los diferentes maíces pueden ser del tipo almidón o cristalino.
- Aleurona: Capa fina que envuelve al endospermo de colores amarillo, incoloro, rojo, plomo o morado.
- Pericarpio o cáscara: Compuesto por varias capas de células, protege la semilla antes y después de la siembra, del ataque de hongos y bacterias.



**Figura 2.** Anatomía del grano de maíz

Fuente: Rosales, 2019.

#### **2.6.4. Características químicas del grano de maíz**

El maíz está compuesto de 70 % - 75 % de almidón, 8 % - 10 % de proteína, 4 % - 5 % de lípidos, 1 % - 3 % de azúcares y 1 % – 4 % de cenizas (Guacho-Abarca, 2014), compuestos que pueden apreciarse de forma discriminada en la tabla 4. Los granos inmaduros contienen niveles relativamente altos de azúcares y menores cantidades de almidón, proteína y lípidos, ya que éstos se acumulan durante la maduración (Mansilla, 2018). El maíz posee el grano de mayor tamaño en relación con el resto de los cereales, cuyo peso de cien semillas rondan en promedio los 30 gramos. Debido a la gran diversidad genética de esta especie, existe una

amplia gama de fenotipos de distintos colores, formas y tamaños (Noguera-Varon, 2020). Las diferencias de color se deben principalmente a pigmentaciones en el pericarpio y en la capa de aleurona (Salinas y Cruz, 2012), mientras que las diferencias en la forma y el tamaño se deben en gran medida a la posición en la mazorca. Aquellos que se ubican en los extremos de la espiga son más redondeados, mientras que los ubicados en la parte central, presentan los laterales más achatados debido a la presión ejercida por el empaquetamiento de los granos en la hilera (Mansilla, 2018).

**Tabla 4.** Composición química proximal de las partes principales de los granos de maíz (%)

Componente Químico	Pericarpio	Endospermo	Germen
Proteínas	3,7	8,0	18,4
Extracto etéreo	1,0	0,8	33,2
Fibra cruda	86,7	2,7	8,8
Cenizas	0,8	0,3	10,5
Almidón	7,3	87,6	8,3
Azúcares	0,34	0,62	10,8

Fuente: Sánchez-Ortega, 2014.

## 2.7. El almidón

El almidón es un carbohidrato de reserva sintetizado y almacenado como fuente de energía en plantas superiores, el almidón es una materia prima con un amplio campo de aplicaciones que van desde la impartición de textura y consistencia en alimentos (Hidalgo y Micho, 2016), hasta la manufactura de papel, adhesivos y empaques biodegradables. Debido a que el almidón es el polisacárido más utilizado como ingrediente funcional (espesante, estabilizante y gelificante) en la industria alimentaria (Rivera, 2017). La funcionalidad de este carbohidrato depende del peso molecular promedio de la amilosa y la amilopectina, así como de la organización molecular de estos glucanos dentro del gránulo (Hoyos, 2015).

El almidón es el principal constituyente del maíz (*Zea mays* L.) y las propiedades fisicoquímicas y funcionales de este polisacárido están estrechamente relacionadas con su estructura.

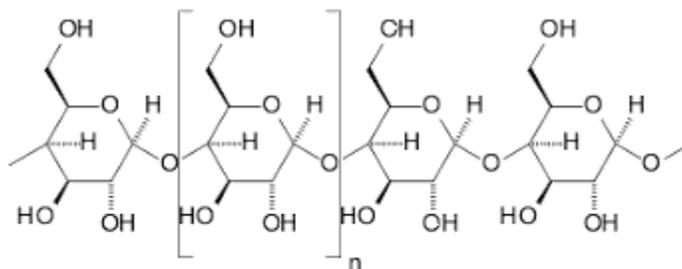
El almidón está formado por dos polímeros de glucosa: amilosa y amilopectina, estas moléculas se organizan en anillos concéntricos para originar la estructura granular. El almidón presenta una estructura cristalina (Hoyos, 2015) de la cual es responsable la molécula de amilopectina e indica un ordenamiento de los componentes del almidón dentro del gránulo la distribución de la amilosa dentro de los anillos concéntricos difiere entre el centro y la periferia del gránulo, ya que sólo ocupa los lugares disponibles que deja la amilopectina después de sintetizarse (Agama, et al., 2013).

### 2.7.1. Composición química del almidón.

El almidón es un polímero de condensación de glucosa en una proporción de átomos de  $C_6$ ,  $H_{10}$  y  $O_5$  que está presente en forma granular en las semillas, tubérculos y raíces. La forma y el tamaño del gránulo varía con el grano. El almidón no es un producto uniforme, la mayoría de los almidones contienen dos polímeros: amilosa y amilopectina que se encuentran en proporciones diferentes en los granos (Guacho-Abarca, 2014).

### 2.7.2. Amilosa.

La amilosa es un polímero lineal que contiene hasta 6000 unidades de glucosa con enlace  $\alpha$ -1,4; los cuales constituyen un 99 % de la molécula, con algunas ramificaciones que contienen de 3 a 20 cadenas de glucosa, figura 3.



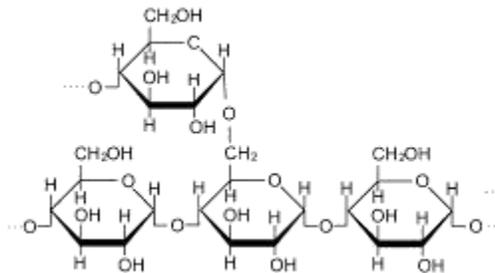
**Figura 3.** Estructura química de la amilosa.

Fuente: Meneses, et al., 2007.

### 2.7.3. Amilopectina.

La amilopectina es el componente mayoritario en los almidones. Se caracteriza por tener un gran número de ramificaciones, que le dan una forma molecular similar a la de un árbol; las

ramas están unidas al tronco central por enlaces  $\alpha$  (1-4) semejante a la amilosa, las ramificaciones se localizan cada 15 a 25 unidades lineales de glucosa y están unidas por enlaces  $\alpha$  (1-6) (Sigala, 2019), tal como evidencia la figura 4.



**Figura 4.** Estructura química de la amilopectina.

Fuente: Sigala, 2019.

#### 2.7.4. Estructuras cristalinas

Las estructuras cristalinas nos permiten clasificar compuestos de acuerdo con su naturaleza, debido a que tiene una serie de propiedades simétricas que son características de su base estructural y que tienen compatibilidad con la simetría de la red directa, las cuales están determinadas por celdas unidad que se pueden agrupar en siete grupos denominados sistemas cristalinos (Meléndez, 2021).

Las estructuras cristalinas presentes en los almidones son hexagonales y/o ortorrómbicas, los almidones tipo A contienen una estructura ortorrómbica y por su parte los almidones de tipo B contienen una estructura hexagonal (Rodríguez-García, et al., 2020).

#### 2.7.5. Aislamiento del almidón.

En los últimos años el almidón se ha destacado como materia prima potencial para la elaboración de plásticos biodegradables, por lo que se hace necesario buscar métodos de extracción para satisfacer la creciente demanda de este producto, el cual debe lograrse sin que haya una modificación significativa de su estructura y que este sea obtenido en cantidades suficientes para permitir su análisis (Pineda-Gómez, et al., 2012)

Los diferentes procesos de aislamiento a nivel laboratorio e industrial, son diseñados y adaptados dependiendo de la fuente de obtención (cereales, frutas, tubérculos, raíces), esto con la finalidad de no afectar la composición química, las propiedades físicas y obtener un alto rendimiento de almidón nativo sin dañarlo (Villarroel, et al., 2018). Este estudio se centró en procesos para la extracción de almidón a partir de cereales los cuales son denominados de molienda húmeda.

#### **2.7.6. Caracterización fisicoquímica y morfológica del almidón del almidón**

Un gránulo de almidón contiene proporciones variables de amilosa y amilopectina; polisacáridos que están constituidos de cadenas de D-glucosa unidos mediante enlaces  $\alpha$  (1-4). La amilosa es esencialmente lineal, mientras que la amilopectina está altamente ramificada mediante enlaces  $\alpha$  (1-6) (Rivas-González, et al., 2008). Estas dos moléculas poseen propiedades físicas y químicas muy diferentes, las que influyen en las características de los alimentos, a saber, propiedades físicas de temperatura, gelatinización del almidón, así como funcionales como estabilizadores y nutricionales de los almidones (Badui-Dergal, 2006).

A su vez, es importante mencionar que estos dos compuestos asociados al almidón influyen directamente en sus características morfológicas, debido a que los gránulos de almidón son responsables de las propiedades de textura en los productos elaborados con este material (Agama-Acedevó, et al., 2011). En relación con la estructura cristalinográfica del almidón también se encuentra asociada a su composición, esto debido a que la amilopectina forma cristales polimórficos tipo A y B que influyen en el arreglo de sus dobles hélices, las que dependerán de los porcentajes de este compuesto presentes en los diferentes materiales que contienen almidón (Rodríguez-García, et al., 2020).

### 3. Objetivos

#### 3.1. Objetivo general

Evaluar el efecto que generan los campos electromagnéticos inducidos sobre las variables de crecimiento, desarrollo y productividad de plantas de *Zea mays* L. var Porva como alternativa tecnológica sostenible para la producción agrícola de este cultivo.

#### 3.2. Objetivos específicos

- Analizar el efecto de los campos electromagnéticos inducidos con diferentes intensidades y tiempos de exposición sobre el proceso de germinación de semillas en de *Zea mays* L. var Porva.
- Analizar la incidencia de los campos electromagnéticos sobre la síntesis de pigmentos en plantas de *Zea mays* L. var Porva sometidas a campos electromagnéticos inducidos.
- Determinar los efectos directamente manifiestos sobre las variables de crecimiento y desarrollo de las plantas objeto de estudio frente a la inducción con campos electromagnéticos de baja intensidad.
- Establecer los efectos sobre la productividad (rendimiento y calidad) del cultivo de *Zea mays* L. var Porva cuyas semillas fueron sometidas a campos electromagnéticos inducidos.

## 4. Metodología

### 4.1. Ubicación en tiempo y espacio

El desarrollo del proyecto de investigación tuvo lugar en el laboratorio de Ingredientes Naturales (Etapa I) y parcelas experimentales (Etapa II) que simularon las condiciones de campo del cultivo en la Fundación Universitaria Agraria de Colombia - UNIAGRARIA. Esta se encuentra ubicada en la calle 170 No 54A -10, Bogotá D.C (Colombia), con coordenadas 4°45'70"N y a 74°03'12"O, una elevación 2650 m sobre el nivel del mar (msnm), humedad relativa del 94% y una temperatura anual promedio de 14 °C (Suárez-Rivero, et al., 2017).

### 4.2. Material vegetal y su acondicionamiento

Se empleó semilla comercial certificada de maíz (*Zea mays* L. var Porva) dada la importancia que este cultivo posee en la canasta básica alimenticia de Colombia y ser la variedad utilizada en condiciones de la Sabana de Bogotá. Para el desarrollo de la Etapa I inicialmente se realizó el empaqueo de 100 semillas en bolsas elaboradas con papel filtro cuantitativo sin cenizas con tamaño nominal de poro de 12 - 15 µm. Posteriormente se realizó la inducción de los campos electromagnéticos a baja intensidad en los montajes de inducción electromagnética colocando las bolsas sobre el norte magnético. Esta última condición dado resultados preexperimentales que evidencian mayor potencial cuando las semillas se exponen a las líneas salientes en la bobina.

### 4.3. Inducción de los campos electromagnéticos de baja intensidad sobre semillas

Para el proceso de inducción de campos electromagnéticos de baja intensidad se emplearon bobinas, las cuales llevaron una carga de Voltios (V) y Amperios (A), con un capacitador eléctrico. Para poder lograr las intensidades experimentales se aplicó la ecuación (1) citada por Suárez-Rivero, et al. (2017):

$$B = \frac{\mu_0 i_0 N}{L} \text{ (T)} \quad (1)$$

Dónde:  $i_0$  = Intensidad eléctrica (A),  $\mu_0$  = constante permanecía en el espacio ( $4\pi 10^{-7} \text{ N/A}^2$ ),  
N= número de espiras, L= Alto de la bobina (m) y B= Campo magnético generado (T).

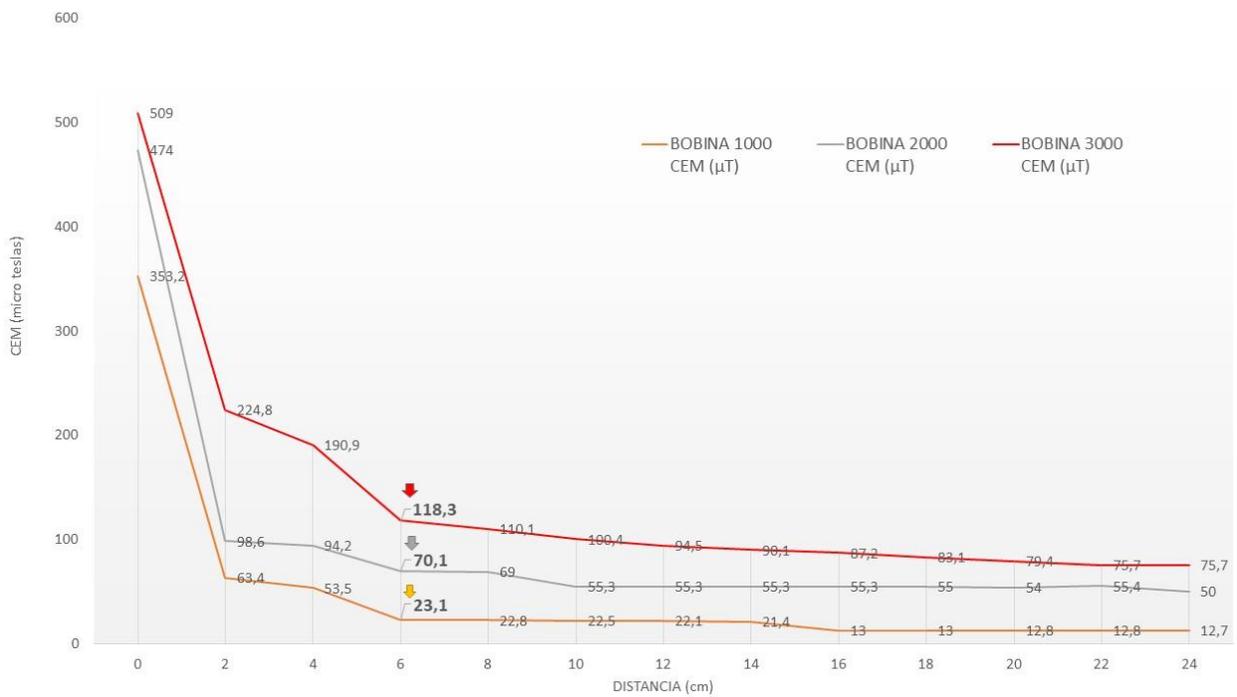
Con base a lo anterior, se conformó un circuito con bobinas de 3,5 cm de altura y con 1000, 2000 y 3000 espiras respectivamente. Las bobinas usadas son de alambre de cobre con un diámetro del filamento del embobinado de 0,364 mm para la bobina de 1000 espiras, 0,367 mm para la bobina de 2000 espiras y de 0,191 mm para la bobina de 3000 espiras; así mismo se empleó en el montaje fuente de alimentación dual (garantizan corriente continua) empleando conexiones entre las fuentes y las bobinas con cables tipo banana - caimán, generando una corriente (i) de 0.53 A y un voltaje de 8,7 V (en bobina de 1000 espiras), 0,15 A y un voltaje de 14,2 V (en bobina de 2000 espiras) y 0,22 A y un voltaje de 28,0 V (en bobina de 3000 espiras). La intensidad del campo se verificó con el sensor *Magnetic Field* acoplado a una interfase GLX *Xplorer*. Las bolsas de semillas previamente empacadas (en forma laminar para tener una inducción de Campos Electromagnéticos - CEM a todas las semillas homogénea) fueron colocadas en la parte superior de las bobinas a una distancia de 2 cm respecto al borde superior de la bobina y con las líneas de CEM saliendo del embobinado (verificado con el sensor *Magnetic Field* para la intensidad y brújula para la detección del sentido de las líneas del campo), con tiempos de exposición de 60´ diarios por 15 días, 180´ diarios por 15 días, 300´ diarios por 15 días y permanente durante los 15 días, ello para los 3 campos electromagnéticos de baja intensidad antes mencionados. El montaje puede observarse en la figura 5 y la verificación mediante simulación en las figuras 6 y 7. Es de resaltar que la simulación mostrada en la figura 7 se realizó empleando el Software Ansys HFSS (High Frequency Structure Simulator) versión 2022 para estudiantes, el cual se constituye como un software de simulación electromagnética y cuyo resultado para las tres bobinas se muestra en la figura 7. HFSS de Ansoft emplea el método del Elemento Finito (FEM), acoplamiento adoptivo, y gráficos brillantes para dar un rendimiento mejorado y un acierto a los problemas electromagnéticos. Las señales de la fuente fueron las mismas utilizadas en el desarrollo experimental. En el contexto anterior y relacionando las figuras 6 y 7, se puede observar que la distribución del campo electromagnético en cada uno de los casos mantiene una conducta similar entre la simulación en Ansys HFSS (figura 7) y los datos por medición directa con el sensor *Magnetic*

Field (figura 6), lo que permitió elegir la distancia de la bobina a la que debía colocarse el sobre con las cariósides (2 cm).



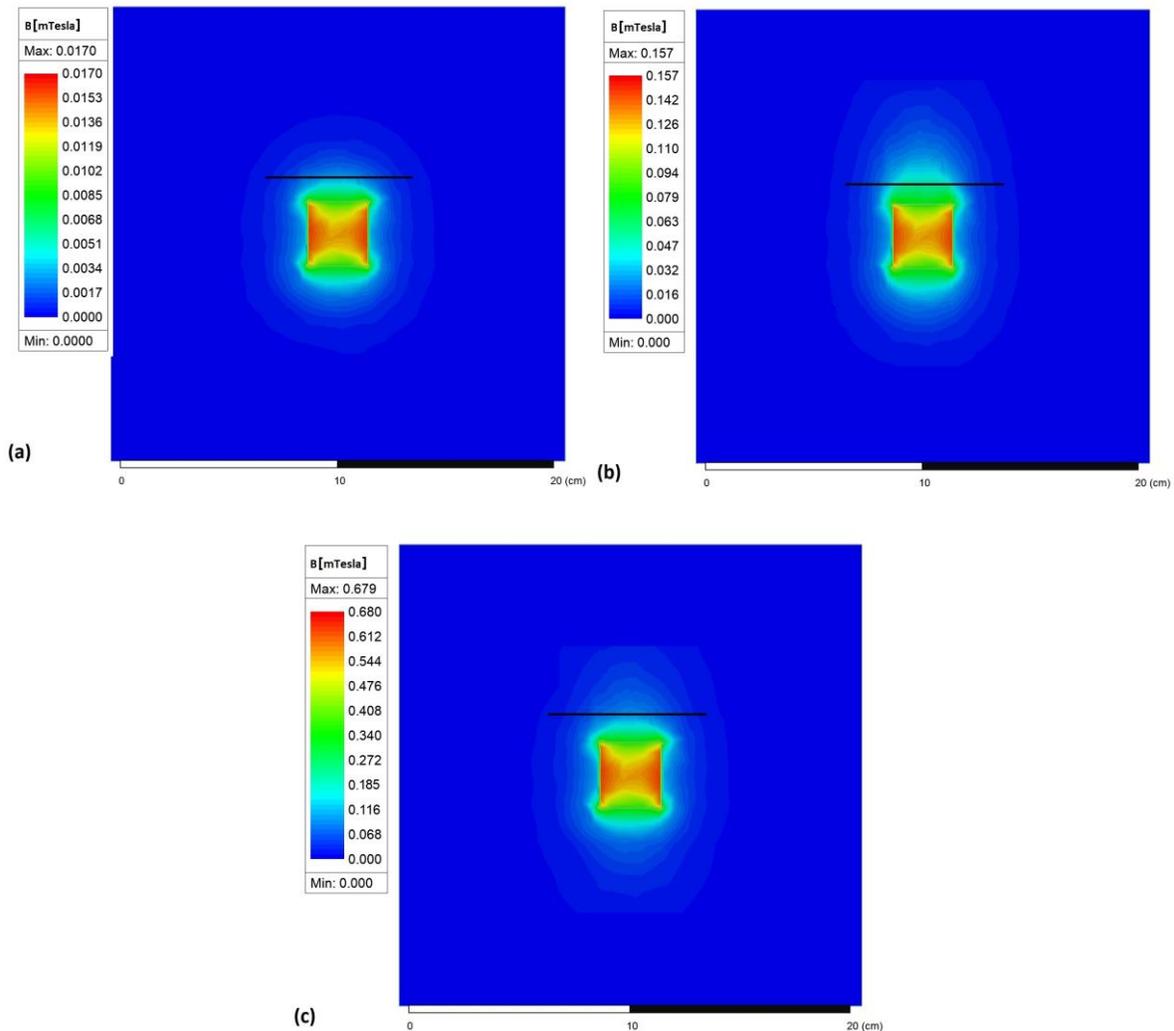
**Figura 5.** Montaje de campos electromagnéticos.

Fuente: Propia.



**Figura 6.** Medición del campo electromagnético con uso de sensor de CEM.

Fuente: Propia



**Figura 7.** Simulación de la distribución espacial del B con el uso de corriente continua (a. bobina de 1000 espiras, b. bobina de 2000 espiras y c. bobina de 3000 espiras). La línea negra indica la posición donde se colocó el material biológico para el tratamiento electromagnético.

Fuente: Propia.

#### 4.4. Establecimiento en condiciones de campo del cultivo

La siembra se realizó de forma directa (Etapa 2) en parcelas experimentales dedicadas a cultivos transitorios y acondicionadas para la evaluación. El suelo presente en las parcelas es un Andisol, formado principalmente a partir de ceniza volcánica, caracterizado por ser de profundo a muy profundo, de texturas finas a moderadamente gruesas (IGAC, 2019). El manejo

agronómico de las parcelas se realizó siguiendo un patrón de laboreo mínimo con un marco de plantación de 0,25 x 1,00 m. Este sistema aborda elementos del sistema empleados en Colombia para maíz amarillo tradicional y para el tecnificado, ajustándose así a la forma en que se produce en el país y reporta FENALCE (2022).

No se realizó aplicación de pesticidas inorgánicos o sintéticos, se tenía previsto, de ser necesaria, aplicación de hidrolatos para el manejo de plagas y enfermedades, pero no hubo afectaciones. La fertilización se realizó en un único momento unido a la siembra a razón de 430 kg ha<sup>-1</sup> con formulación 15-15-15 según lo establece la recomendación técnica para este cultivo y esta variedad en la Sabana de Bogotá, citada por FENALCE (2022). Cada parcela experimental se constituyó por 4 surcos por 10 m de longitud, para un área de 40 m<sup>2</sup> sin dejar surcos vacíos entre parcelas.

#### **4.5. Análisis del efecto de los campos electromagnéticos sobre el proceso de germinación**

El porcentaje de germinación (%G), se estableció como la relación de las semillas sembradas sobre el número de semillas germinadas, indicando en modo de porcentaje y así indicar la eficiencia de la aplicación de este tipo de tratamientos sobre la semilla botánica como material de propagación. Las 100 cariósides (frutos de maíz) por tratamiento fueron sembrados en bandejas de plantación (fabricadas en polipropileno) de 100 alveolos, los que se rellenaron con fibra de coco esterilizada; se aplicó un riego diario durante los 15 días de duración del ensayo. Cada montaje y el control se separaron de forma equidistante para evitar solapamiento de las líneas del campo generadas. Para poder calcular el porcentaje de germinación se utilizó la ecuación (2) (Wilches-Rojas, 2008).

$$\%G = \left( \frac{N}{N_s} \right) * 100 \quad (2)$$

Donde: %G= Porcentaje de germinación, N=Número de plantas germinadas y N<sub>s</sub>= Número de semillas sembradas.

Por otra parte, unísono al %G se realizó el establecimiento de la dinámica de crecimiento del cultivo. Para ello se siguió la metodología propuesta por Sedano, et al. (2005) ajustando el número de plantas a 30 por tratamiento, es decir, 10 por réplica.

#### **4.6. Análisis de la incidencia de los campos electromagnéticos sobre la síntesis de pigmentos**

La determinación de pigmentos se realizó bajo los procedimientos planteados por la AOAC (1990) citado y ajustado por Suárez-Rivero, et al. (2016). Estos se basan principalmente en el uso de la espectrofotometría, con el fin de determinar el contenido de clorofila tipo A, tipo B y totales (ecuaciones 3 a la 5) expresado en unidades SPAD. Esta medición se realizó en dos momentos y por triplicado (se emplearon hojas fotosintéticamente activas), siendo fijado el primer momento a los 20 días después de la germinación; el segundo momento con un espaciamiento temporal de 120 días. Las plantas para muestrear fueron seleccionadas de forma aleatoria dentro de cada tratamiento.

$$\text{Clorofila a (ChlA)} = (12.25 * A_{663\text{nm}}) - (2.79 * A_{647\text{nm}}) \quad (3)$$

$$\text{Clorofila b (ChlB)} = (21.5 * A_{647\text{nm}}) - (5.1 * A_{663\text{nm}}) \quad (4)$$

$$\text{Clorofila t (ChlT)} = (7.15 * A_{663\text{nm}}) - (18.7 * A_{647\text{nm}}) \quad (5)$$

Estas ecuaciones tienen en cuenta los coeficientes de absortividad molar de estos pigmentos cuando se encuentran presentes en una misma solución de acetona al 80 %.

#### **4.7. Efectos sobre las variables de crecimiento y desarrollo ante la inducción electromagnética de baja intensidad**

Para la evaluación de los efectos generados por los campos electromagnéticos es necesario recurrir al establecimiento de área foliar ( $\text{cm}^2$ ), masa fresca en (g), masa seca (g), tomados estos como base para el cálculo de los indicadores de desarrollo como se aprecia en las ecuaciones 6 a la 12 (Tasa de Crecimiento Relativo – TCR, Tasa de Asimilación Neta – TAN, Índice de Área Foliar – IAF, Tasa de Crecimiento de Cultivo – TCC, Tasa Absoluta de

Crecimiento – TAC, Duración de Área Foliar – DAF y Área Foliar Especifica - AFE) citados por Suárez-Rivero, et al. (2016), y que pueden ser observadas en la tabla 5.

**Tabla 5.** Índices fisiológicos empleados

Índice de crecimiento	Símbolo	Valor instantáneo	Valor promedio en un intervalo de tiempo (T <sub>2</sub> -T <sub>1</sub> )	Unidades	Consecutivo de ecuación (Ec.)
Tasa de Crecimiento o Relativo	TCC	$\frac{1}{w} \frac{dw}{dt}$	$TCR = \frac{(\ln W_2 - \ln W_1)}{(T_2 - T_1)}$	g(g día) <sup>-1</sup>	(6)
Tasa de Asimilación Neta	TAN	$\frac{1}{AF} \frac{dw}{dt}$	$TAN = \frac{\frac{(W_2 - W_1)}{(T_2 - T_1)}}{\frac{(\ln AF_2 - \ln AF_1)}{(AF_2 - AF_1)}}$	g(cm <sup>2</sup> día) <sup>-1</sup>	(7)
Índice de Área Foliar	IAF	$\frac{AF}{AS}$	$IAF = \frac{\frac{(AF_2 - AF_1)}{2}}{\frac{1}{As}}$	Dimensional según unidades	(8)
Tasa de Crecimiento del Cultivo	TCC	$\frac{1}{As} \frac{dw}{dt}$	$TCC = \frac{1}{As} * \frac{(W_2 - W_1)}{(T_2 - T_1)}$	g (cm <sup>2</sup> día) <sup>-1</sup>	(9)
Tasa Absoluta de Crecimiento	TAC	$\frac{dw}{dt}$	$TAC = \frac{(W_2 - W_1)}{(T_2 - T_1)}$	g día <sup>-1</sup>	(10)
Duración del Área Foliar	DAF	-	$DAF = \frac{(AF_2 - AF_1) * (T_2 - T_1)}{2}$	cm <sup>2</sup> día <sup>-1</sup>	(11)
Área Foliar Específica	AFE	$\frac{AF}{MF}$	$AFE = \frac{\frac{AF_2}{W_2} + \frac{AF_1}{W_1}}{2}$	cm <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>	(12)

(dw= derivada de la función, AF=área foliar, As= área del suelo, MF= masa seca foliar, Dt T= tiempo, W= masa seca) Fuente: Suárez-Rivero, et. al. (2017)

Todas las mediciones se realizaron sobre 30 plantas por tratamiento (10 por réplica) seleccionadas al azar.

#### 4.8. Efectos sobre las variables de productividad (rendimiento y calidad) ante la inducción electromagnética de baja intensidad

Estos efectos fueron establecidos al final del ciclo productivo. En tal sentido se establecieron:

- Rendimiento en mazorca y en granos: Es una magnitud de la biomasa expresada a razón de las t ha<sup>-1</sup> en base a peso fresco producido sobre 20 plantas seleccionadas al azar por tratamiento.
- Morfología de la mazorca: Peso de mazorca con amero (PA), Peso de la tusa (PT), Peso de los granos por mazorca (PGr) y número de hileras por mazorca (NH). Estas mediciones fueron realizadas de forma directa mediante pesaje en balanza semianalítica marca Vibra AJ 2200 g X 0.01 g con calibración externa, así mismo, el conteo de las hileras se realizó mediante conteo directo.
- Aislamiento del almidón en el endospermo: El almidón de maíz se aisló mediante un procedimiento de molienda húmeda (Pineda-Gómez, et al., 2012). Los granos de maíz se licuaron con agua destilada. La mezcla se escurrió con malla US 20 y la solución obtenida se refrigeró a 4 °C durante 24 h hasta la precipitación del almidón. Posteriormente, se decantó el sobrenadante y se lavó abundantemente el precipitado con agua destilada para eliminar la fibra soluble y otros compuestos indeseables. A continuación, el residuo se lavó con agua destilada y se tamizó hasta eliminar todo el almidón de la suspensión. La suspensión final se mantuvo a 4 °C durante 24 h para sedimentar el almidón y luego se decantó el agua. El precipitado se eliminó con cuidado y la capa inferior blanca se secó a 40 ± 5 °C durante 8 h. Finalmente, el almidón se molió y se tamizó a través de una malla estándar de EE. UU. número 100 (150 µm). Cabe mencionar que mientras inició el proceso de análisis objeto de estudio del proyecto, el almidón se almacenó en bolsas ziploc y se llevaron a un desecador con el fin de evitar la compresión de los granos de almidón y su hidratación.
- Análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido (MEB): La morfología de los almidones de maíz se estudió con un microscopio electrónico de barrido de alto vacío (JEOL, JSM-6060LV). Las muestras se fijaron en un porta muestras con cinta de carbono y se rociaron con oro. Las condiciones de análisis utilizadas fueron de 20 kV de

tensión de aceleración de electrones a 12-20 Pa de presión (Cervantes-Ramírez, et al., 2020).

- Análisis cristalográfico por difracción de rayos X: El patrón de difracción de rayos X de los almidones aislados se realizó en un difractómetro Rigaku-Ultima IV. Las condiciones de operación fueron 35 kV y 15 mA, con una longitud de onda de radiación CuK $\alpha$  de  $\lambda=0,1546$  nm, y de 5 a 50° en una escala de 2 $\theta$  con un tamaño de paso de 0,05°. Las muestras de polvo se empaquetaron densamente en una bandeja de aluminio (Cornejo-Villegas, et al., 2017).
- Viscosidad aparente (VA): El perfil de viscosidad aparente de los almidones aislados de maíz se obtuvo utilizando una célula de almidón de un reómetro Anton Paar modelo MCR 102 (St Albans, Reino Unido). Las muestras se calentaron durante 5,3 minutos de 50 a 92 °C y luego se mantuvieron a 92 °C durante 5,3 minutos. A continuación, las muestras se enfriaron a 50 °C durante 5,3 min y se mantuvieron constantes durante 1 min. Todos los ensayos se realizaron a una frecuencia constante de 193 rpm.
- Propiedades vibracionales mediante infrarrojo por transformación de Fourier (FT - IR): Esta técnica se basó en análisis partiendo de que los enlaces covalentes de toda molécula absorben selectivamente radiación de longitudes de onda específicas, lo que conlleva a un cambio en la energía vibracional del enlace. Dado lo anterior, el tipo de vibración sea de estiramiento o flexión inducida por la radiación infrarroja depende así de los átomos del enlace. Dado que los distintos enlaces y grupos funcionales absorben frecuencias diferentes, el patrón de transmitancia varía según la molécula. En este contexto, esta técnica permitió la confirmación de la modificación o no en las estructuras químicas del almidón. Los espectros infrarrojos se obtuvieron en un espectrómetro IR Perkin Elmer (modelo Spectrum Two, Waltham-USA), utilizando un cristal de Diamante/ZnSe), en el rango de 600 - 4000 cm<sup>-1</sup>.

#### 4.9. Diseño Experimental

A continuación, se detallan los elementos componentes del diseño experimental bifactorial 3 x 4, donde 3 son las intensidades del campo y 4 los tiempos de exposición de las semillas a evaluar. Es de resaltar que los muestreos se realizaron de forma aleatoria dentro de cada una de las parcelas para cada una de las variables a analizar. Así mismo, el agrupamiento de las

unidades experimentales en dos direcciones (filas y columnas) en campo y la asignación de los tratamientos al azar en las unidades empleando el cuadrado latino.

#### 4.9.1. Hipótesis

La exposición de semillas de *Zea mays* L. var Porva a campos electromagnéticos producidos mediante corriente continua, aumenta su poder germinativo, proporcionando un tiempo de emergencia menor con respecto a las plantas control y un porcentaje de germinación mayor al que se conoce actualmente, mejorando además las variables de crecimiento y desarrollo de las plantas e incrementando el rendimiento de estas.

#### 4.9.2. Variables

Variables independientes:

- Tiempo de exposición (minutos).
- Intensidad del campo electromagnético ( $\mu\text{T}$ ).

Variables dependientes:

- Germinación (%G y dinámica de crecimiento).
- Contenido de pigmentos expresado en unidades SPAD (clorofilas A, B y totales).
- Indicadores fisiológicos
- Indicadores de productividad (rendimiento y calidad del almidón)

#### 4.9.3. Factores

Factor A. Intensidad del campo electromagnético

- Intensidad 23  $\mu\text{T}$  ( $I_1$ )
- Intensidad 70  $\mu\text{T}$  ( $I_2$ )
- Intensidad 118  $\mu\text{T}$  ( $I_3$ )

Factor B. Tiempo de exposición al campo electromagnético

- Tiempo de exposición 60' ( $E_1$ )
- Tiempo de exposición 180' ( $E_2$ )
- Tiempo de exposición 300' ( $E_3$ )

- Tiempo de exposición permanente (E<sub>4</sub>)

Estos factores de intensidades y tiempos se determinan según investigaciones de (Suárez-Rivero, et al., 2017; Suárez-Rivero, et al., 2016; Ortiz-Aguilar, et al., 2015). Su interacción se muestra en la tabla 6 y se incluye adicionalmente un control (testigo) que no se expone a dichos campos electromagnéticos.

**Tabla 6.** Interacciones en el diseño experimental.

Factores		Tiempo de exposición			
		E1 (60´)	E2 (180´)	E3 (300´)	E4 (Permanente)
Intensidad del Campo	I1 (23 µT)	T1	T2	T3	T4
	I2 (70 µT)	T5	T6	T7	T8
	I3 (118 µT)	T9	T10	T11	T12

Nota: Cada tratamiento dispuso de tres réplicas con 100 individuos por cada una al igual que el control.

#### 4.10. Análisis estadístico

Estadística descriptiva y análisis de varianza: Todos los parámetros objeto de análisis en la variedad de maíz en estudio fueron sometidos a un análisis estadístico descriptivo. En tal sentido se estableció la media de las variables según el número de réplicas declaradas en los procedimientos para cada caso y en cada momento evaluativo. Así mismo se establecieron la desviación estándar y el análisis de varianza – ANOVA ( $\alpha=0,05$ ) para cada momento de muestreo y cada variable analizada con la finalidad de analizar la existencia de diferencias significativas entre los diferentes tratamientos en cada variable de estudio.

Prueba de independencia de ji-cuadrado ( $\chi^2$ ): Con esta prueba se pretende realizar el contraste de hipótesis en torno a que las variables son independientes frente a la hipótesis alternativa de que las variables se distribuyen de modo diferente para diversos niveles de la otra (Imukova, et al., 2016).

Los análisis estadísticos se realizaron incluyendo las pruebas de homogeneidad y homocedasticidad, empleando en todos los casos el software SPSS. Para graficar, en el caso particular de difractogramas de rayos X, Viscosidad Aparente y FT - IR, se empleó el software OriginPRO 2018.

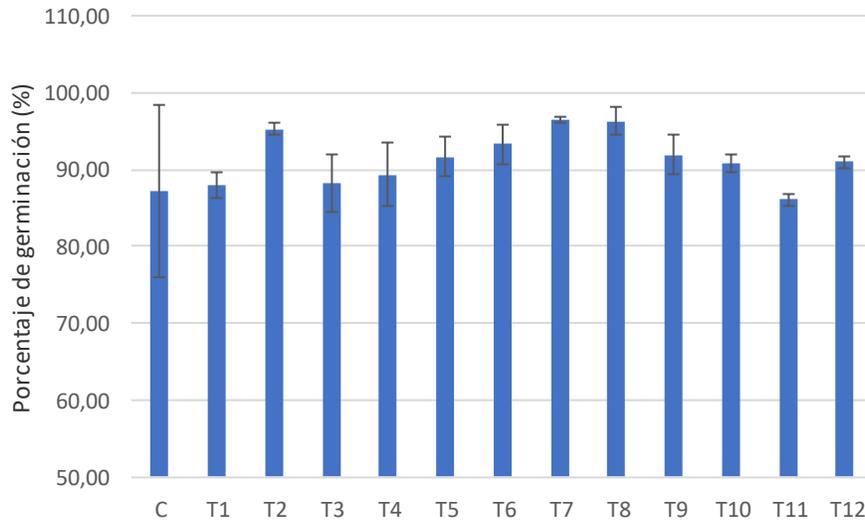
## 5. Resultados y discusión

Este capítulo presenta los resultados divididos en 4 apartados; el primero enfocado a la incidencia de los CEM sobre el proceso de germinación del maíz, seguido de un estudio relacionado a la síntesis de pigmentos, dado la importancia que el aparato fotosintético reviste para las plantas como organismos autótrofos. En tercer lugar, se presenta una interpretación de algunas variables de crecimiento y desarrollo del cultivo que permiten observar cambios físicos en las plantas y así mismo comprender el comportamiento de las estructuras internas, es decir, el desarrollo vegetal. En cuarto lugar, como cierre del ciclo productivo, se muestran parámetros relacionados a la productividad, enmarcada en términos de rendimientos y calidad de la producción, específicamente del almidón contenido en el endospermo.

### 5.1. Efecto de los CEM inducidos sobre el proceso de germinación

El maíz es uno de los cereales fundamentales en la canasta básica colombiana y de forma particular la variedad Porva, siendo esta la más cultivada en la Sabana de Bogotá. Dada las condiciones climatológicas de la región altoandina, este cultivo ve su ciclo productivo prolongado entre 6 y 8 meses, dependiendo del objeto de la producción, viéndose limitado inicialmente el proceso de germinación. En este sentido las figuras 8 a la 10 reflejan el efecto de los campos electromagnéticos a baja intensidad como agente estimulante del proceso de germinación.

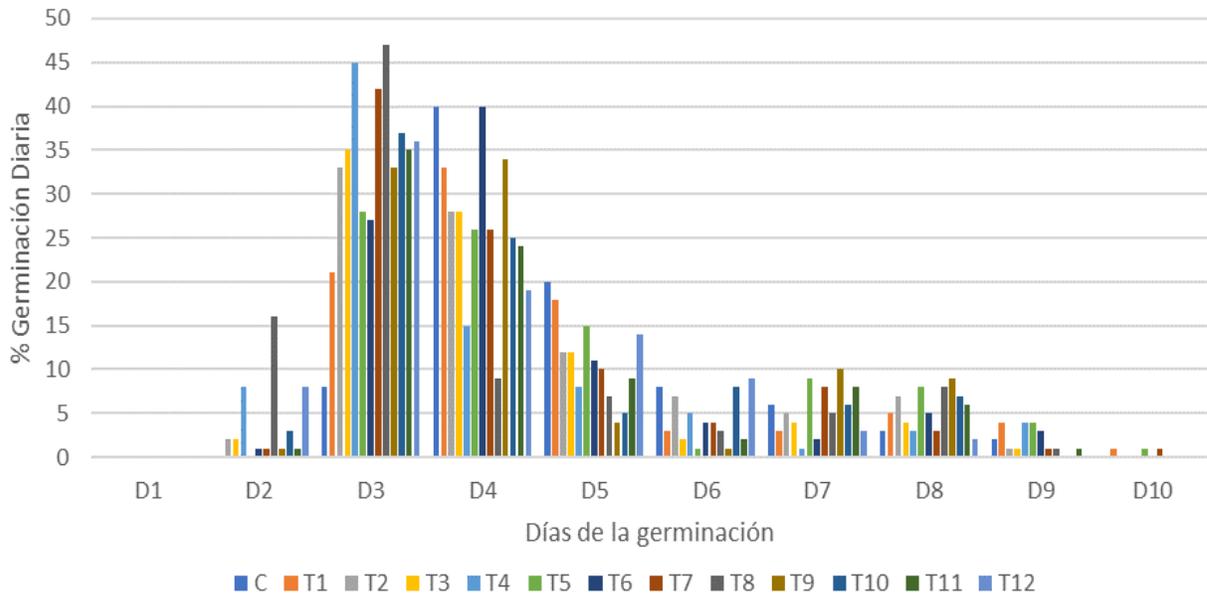
La figura 8 muestra la capacidad que tienen las carióspsides para germinar, dado por el máximo porcentaje de germinación obtenido en el tiempo evaluado (15 días). Es así como aquellos granos de maíz sometidos a los tratamientos T7 y T8 mostraron los más altos valores con 96 %, contrario a lo ocurrido con el C, donde la máxima germinación solo llegó al 87 %. Los resultados para esta variable evidencian que el proceso de germinación se vio estimulado por la aplicación de los campos electromagnéticos a intensidad media (70  $\mu$ T) dentro de las seleccionadas para esta investigación, pero a sus más altos tiempos de exposición (300' y permanente durante 15 días).



**Figura 8.** Porcentaje de germinación.

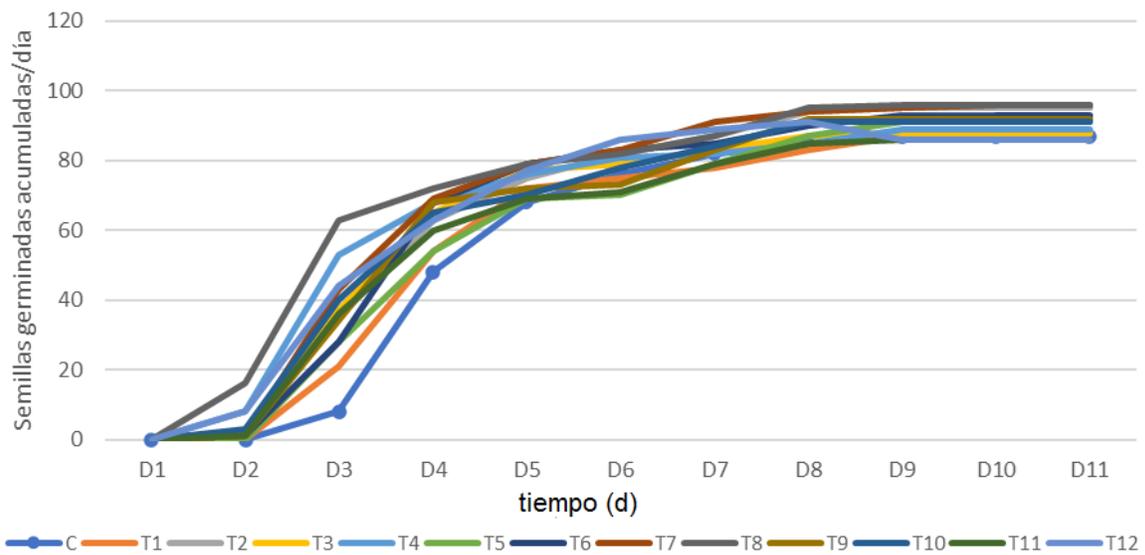
Fuente: Propia.

Conducta similar a la mostrada en la capacidad de germinación se observan en materia de germinación diaria y dinámica de germinación. Las figuras 9 (refleja la germinación absoluta obtenida cada día durante los 15 días que duró la evaluación) y 10 (evidencia la germinación acumulada diaria durante los 15 días de evaluación) evidencian un pico de germinación entre los días 3 y 4 posteriores a la siembra, concentrando en este período valores muy cercanos al 50 % de la germinación total. Es de destacar que para las cariósides control el porcentaje de germinación pasó del 8 al 48 % entre el día 3 y 4 después de la siembra, llegando así al nivel de los tratamientos. Otro elemento que resalta dentro de la figura 10 es lo concerniente al alcance del mayor porcentaje de germinación de cada tratamiento y el control, siendo este en general el día 9 después de la siembra.



**Figura 9.** Germinación diaria o absoluta.

Fuente: Propia.

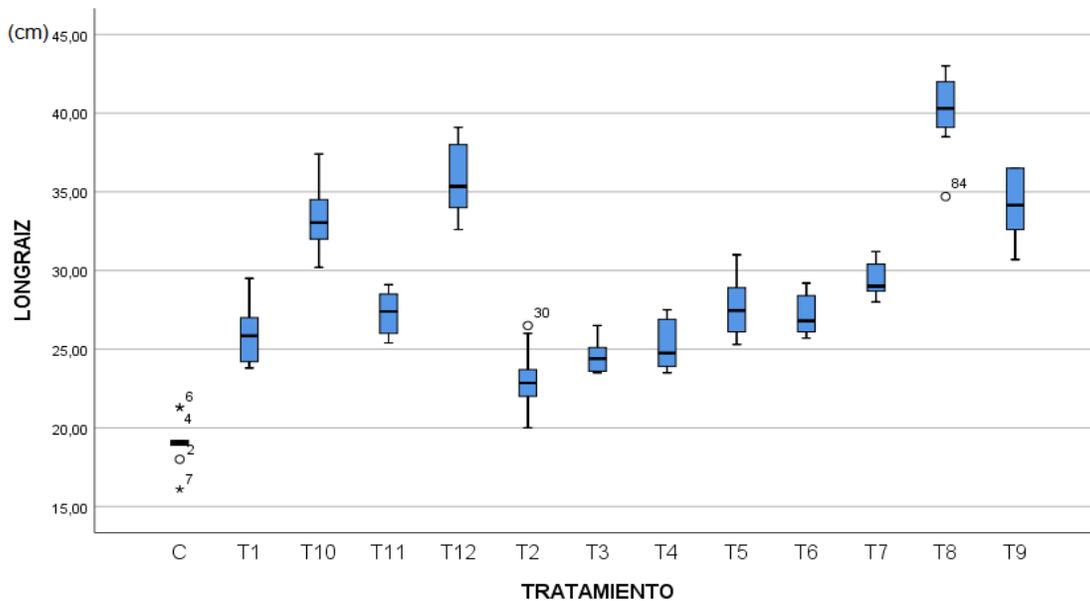


**Figura 10.** Dinámica de germinación en el tiempo o germinación acumulada.

Fuente: Propia.

En términos de densidad del flujo magnético, este se puede describir partiendo de dos niveles con respecto al campo geomagnético, campos magnéticos ultra débiles o vacío magnético (menores a 100 nT) y campos magnéticos débiles (superior a 100 nT < 500  $\mu$ T). En el primero, Maffei (2014) reporta efectos en el desarrollo de las plantas y sobre la transición de las yemas vegetativas a reproductivas (floración). Igualmente, Fischer, et al. (2004) reportaron la incidencia que mostraban los campos magnéticos sobre semillas de girasol, especialmente sobre la masa fresca de la planta, masa fresca de la raíz y la estructura aérea en general. También Yamashita, et al. (2004) discuten en sus estudios sobre los efectos en la elongación celular y presión osmótica, que dan paso a incrementos en la elongación celular a nivel del eje epicotíleo en cultivos de arveja. En frijol Stange, et al. (2002) reportaron la estimulación de plántulas a campos de 10  $\mu$ T y 100  $\mu$ T (rango en el que se encuentran los ensayos desarrollados en este proyecto) a 50 Hz o 60 Hz presentan alteraciones en el transporte de la estructura radical.

En el anterior contexto, en un análisis del comportamiento durante el proceso de germinación y el efecto sobre el crecimiento de la radícula antes de su atrofia y el coleóptilo, las figuras 4 a la 10 evidencian que no solo se vio favorecida la germinación en sí, sino que otras variables mostraron cambios positivos.

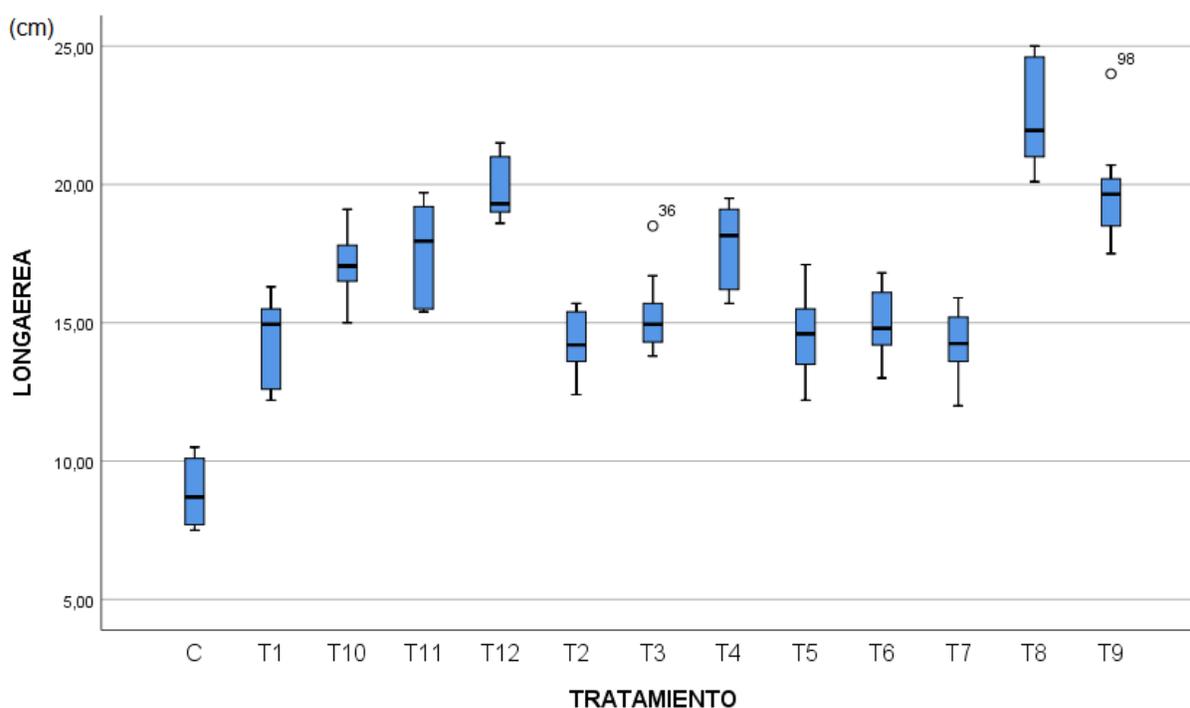


**Figura 11.** Longitud de la raíz más desarrollada del sistema fascicular ( $p < 0,01$ ).

Fuente: Propia.

En este sentido, la figura 11 muestra la comparación entre las medias para esta variable, reflejando, según el ANOVA Unifactorial realizado, que hay diferencias en la puntuación de longitud de la raíz, de acuerdo con los tratamientos empleados ( $F=2,902$ ;  $p<0,01$ ). En este sentido, la mayor longitud media de la raíz se presentó en el tratamiento T8 (40,13 cm), difiriendo significativamente del resto de tratamientos y el control. Este último presentó los valores más bajos para esta variable (C: 19,101 cm), difiriendo de forma significativa de la totalidad de tratamiento, guardando estrecha relación con la conducta observada en las figuras 8 a la 10.

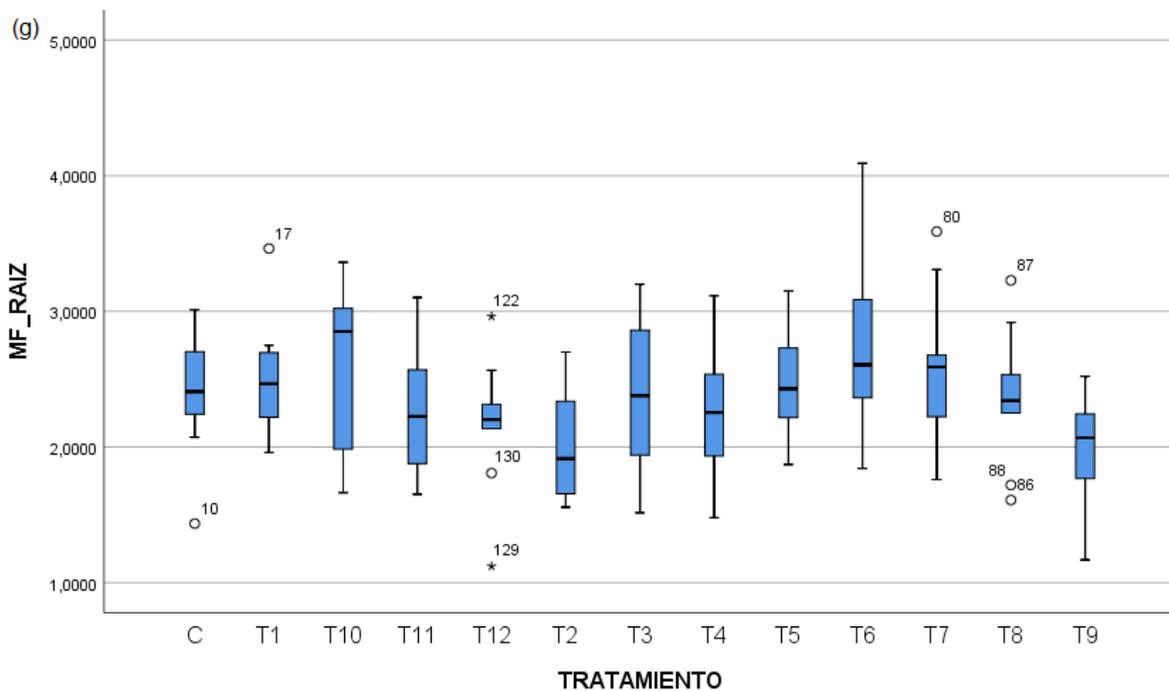
Similar a lo ocurrido en la variable longitud de la raíz, al observar la figura 12, es evidente que la longitud de la parte aérea se vio más estimulada en el T8. Así, el ANOVA Unifactorial indica que hay diferencias en la puntuación de Longitud de la parte aérea, de acuerdo con los tratamientos empleados y el control ( $F= 4,273$ ;  $p<0,01$ ), siendo el T8 con una dimensión de 22,49 cm la mayor altura difiriendo del resto de tratamientos y el control. Por otra parte, los valores medios más bajos se presentaron en el control con 8,92 cm de altura de la parte aérea, difiriendo significativamente de los tratamientos establecidos.



**Figura 12.** Longitud de la parte aérea ( $p<0,01$ ).

Fuente: Propia.

Por otra parte, al analizar las figuras 13 y 14 correspondientes a los contenidos de Masa Fresca y Masa Seca para la raíz, se puede observar que existe una estrecha relación entre los resultados arrojados para estas variables con los señalados para longitudes del tallo y la raíz. El análisis de ANOVA Unifactorial ha permitido inferir que hay diferencias en la puntuación de Masa Fresca de la raíz, de acuerdo con los tratamientos empleados ( $F=0,867$ ;  $p<0,01$ ). En tal sentido, para la variable Masa Fresca se muestra una mayor acumulación en aquellas raíces que provienen de las semillas germinadas bajo las condiciones experimentales del T6 (2,759 g), difiriendo significativamente solo de los tratamientos T2, T4, T9, T11 y T12. Por otra parte, las menores acumulaciones se mostraron en los T9 y T2, difiriendo significativamente de los tratamientos T1, T5, T6, T7 y T10, pero no del control (C).

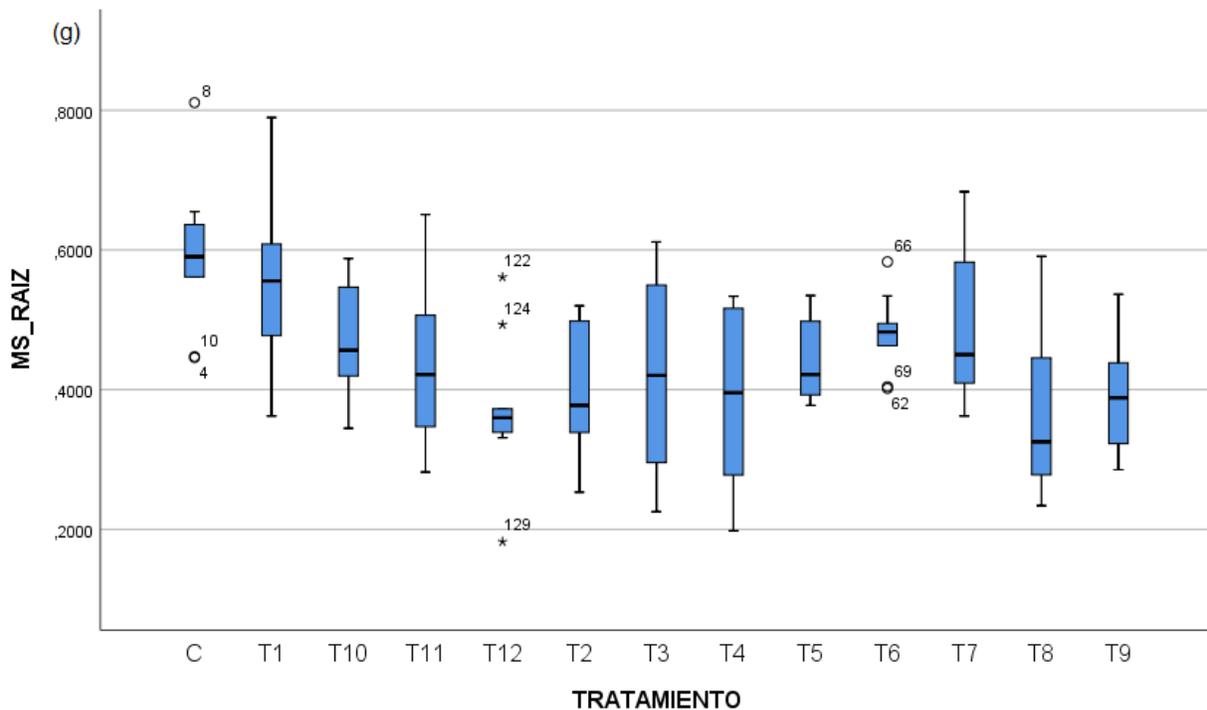


**Figura 13.** Masa fresca de la raíz ( $p<0,01$ ).

Fuente: Propia.

Por su parte la figura 14 revela que el Control (C) presenta los valores más altos de acumulación de masa seca para la raíz, esto podría estar relacionado con el crecimiento más lento que se mostró en la figura 11 para este órgano, así mismo, relacionado a procesos de división celular y consiguiente elongación a nivel meristemático apical más lento. El ANOVA

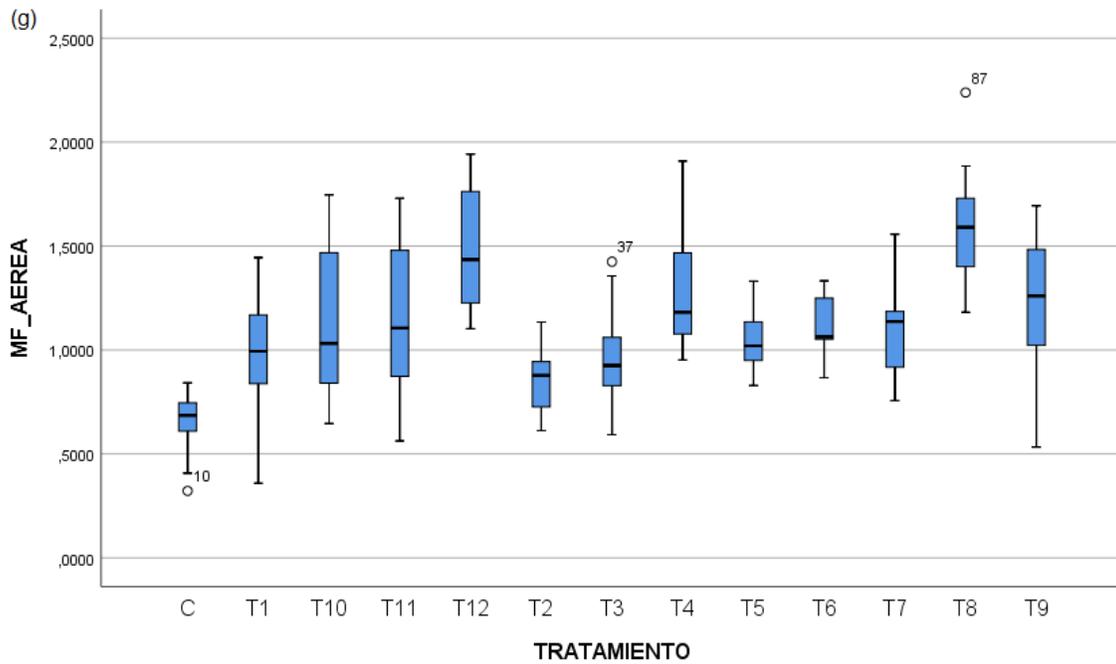
Unifactorial permitió inferir que hay diferencias en la puntuación de Masa Seca de la Raíz, de acuerdo con los tratamientos empleados ( $F=2,504$ ;  $p<0,01$ ). Así, el C acumuló 0,595 g, difiriendo significativamente del resto de tratamientos excepto de T1, siendo T8 (0,363 g) y T12 (0,369 g) los que poseen los más bajos valores y a su vez difieren significativamente de los tratamientos T1, T5, T6, T7, T10 y el Control.



**Figura 14.** Masa seca de la raíz ( $p<0,01$ ).

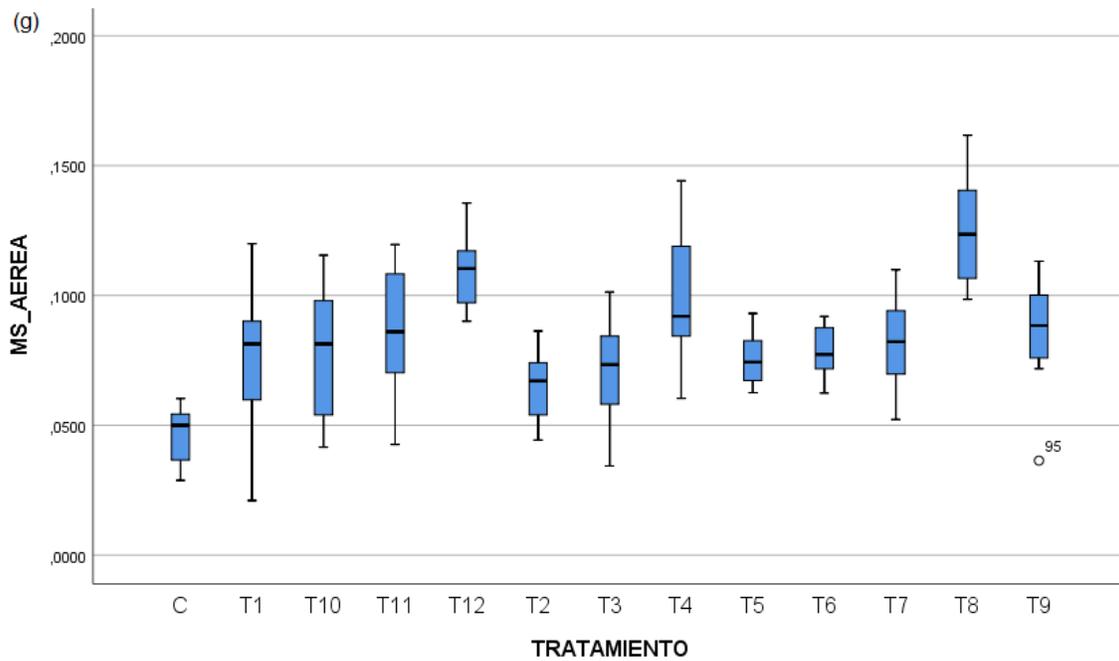
Fuente: Propia.

Desde el análisis de la parte aérea en materia de masa fresca y masa seca (Figuras 15 y 16 respectivamente), se evidenció que los mayores valores acumulativos se presentaron en T8 (Masa Fresca aérea: 1,597, Masa Seca aérea: 0,125), difiriendo significativamente de todos los tratamientos, excepto el T12 para ambas variables. En ambos casos, el ANOVA Unifactorial corroboró que existen diferencias en la puntuación de Masas Secas y Frescas de la parte aérea, de acuerdo con los tratamientos empleados y el control ( $F=1,002$ ;  $p<0,01$ ). Así mismo, los valores más bajos los presentó en ambos casos el Control (Masa Fresca aérea: 0,6425, Masa Seca aérea: 0,0462) difiriendo significativamente de todos los tratamientos, excepto del T2 en materia de masa fresca aérea.



**Figura 15.** Masa fresca aérea ( $p < 0,01$ ).

Fuente: Propia.



**Figura 16.** Masa seca aérea ( $p < 0,01$ ).

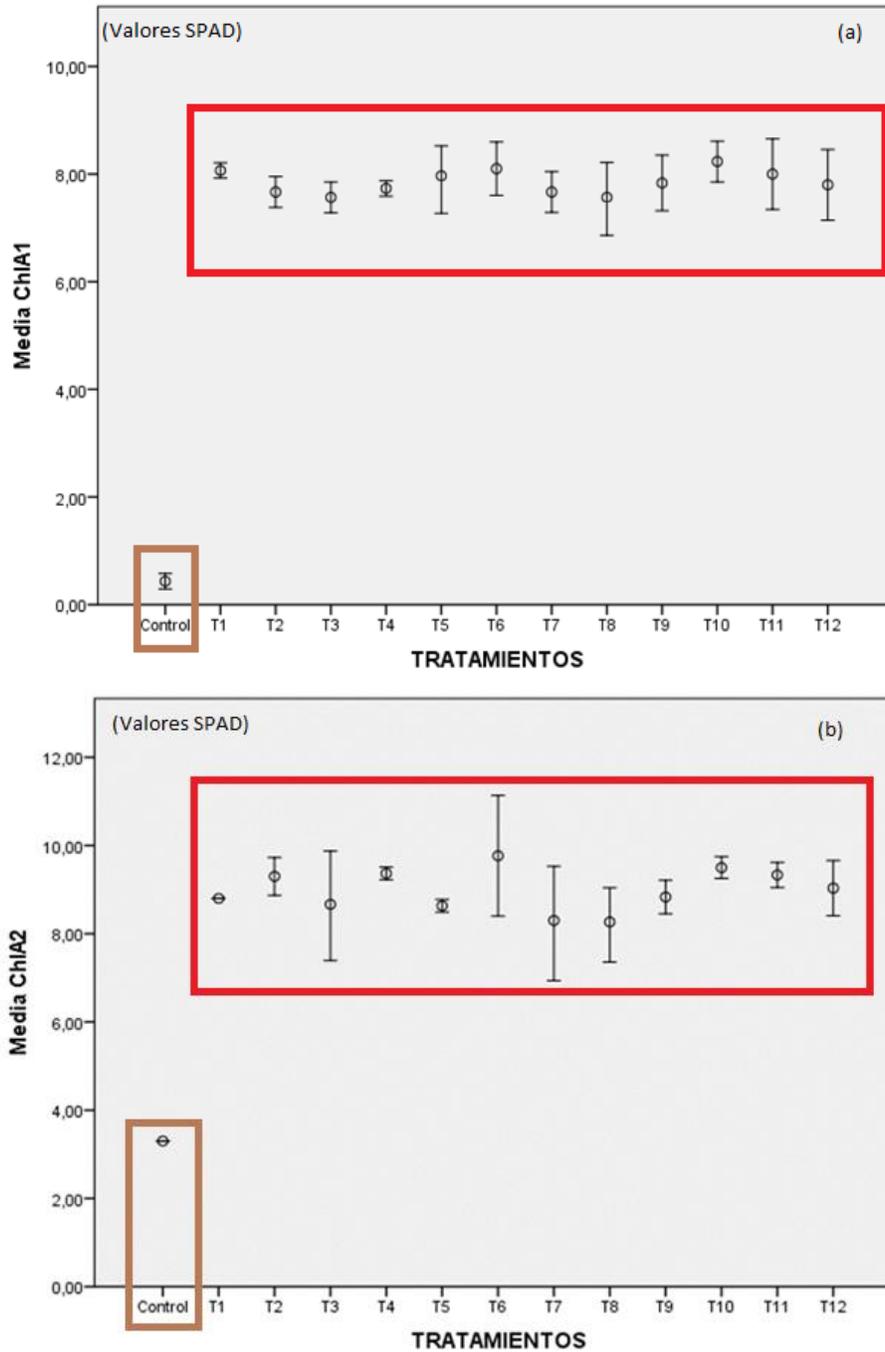
Fuente: Propia.

Existe evidencia en materia de investigaciones que coinciden en que la respuesta positiva a los campos magnéticos o electromagnéticos, estará en función del tiempo que se exponga las semillas a este (Anaya, et al., 2015), a su intensidad, a las condiciones de cultivo (condiciones ambientales), así como al material fitogenético (Suárez-Rivero, et al., 2018); puesto que la respuesta de diferentes plantas a estos estímulos puede estar dada a diferentes combinaciones de campos magnéticos y tiempos de exposición (Aladjadjiyan, 2010). Así, Campos Magnéticos Permanentes - CMP, propician un tropismo significativo sobre las raíces primarias en plántulas de chile (*Capsicum annuum* L.) en presembrado con 62  $\mu$ T de CMP generado por el polo sur, así como un máximo crecimiento de sus plántulas reportaron Nimmi y Madhu (2009) citados por Ortiz-Aguilar, et al. (2015). Así mismo, los CMP de 125 y 250 mT en semillas de tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) en presembrado, indujeron la reducción del tiempo de germinación promedio (Torres, Díaz y Cabal, 2008); incrementando la tasa de germinación, crecimiento y desarrollo de las plántulas de maíz tratadas (*Zea mays* L.) (Ortiz-Aguilar, et al., 2015; Suárez-Rivero, et al., 2016); y en semillas de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) con el empleo de 0.15 T por 30, 50 y 70 minutos, se logró el aumento de la germinación, longitud de los tallos, peso masa fresca y seca de las plántulas (Suárez-Rivero, et al., 2018). Resultados similares reportan para el cultivo de la pimienta Dessie y Habtie (2014) y Elizalde et al. (2017) en semillas de *Hechtia perotensis*.

## 5.2. Incidencia de los campos electromagnéticos sobre la síntesis de pigmentos

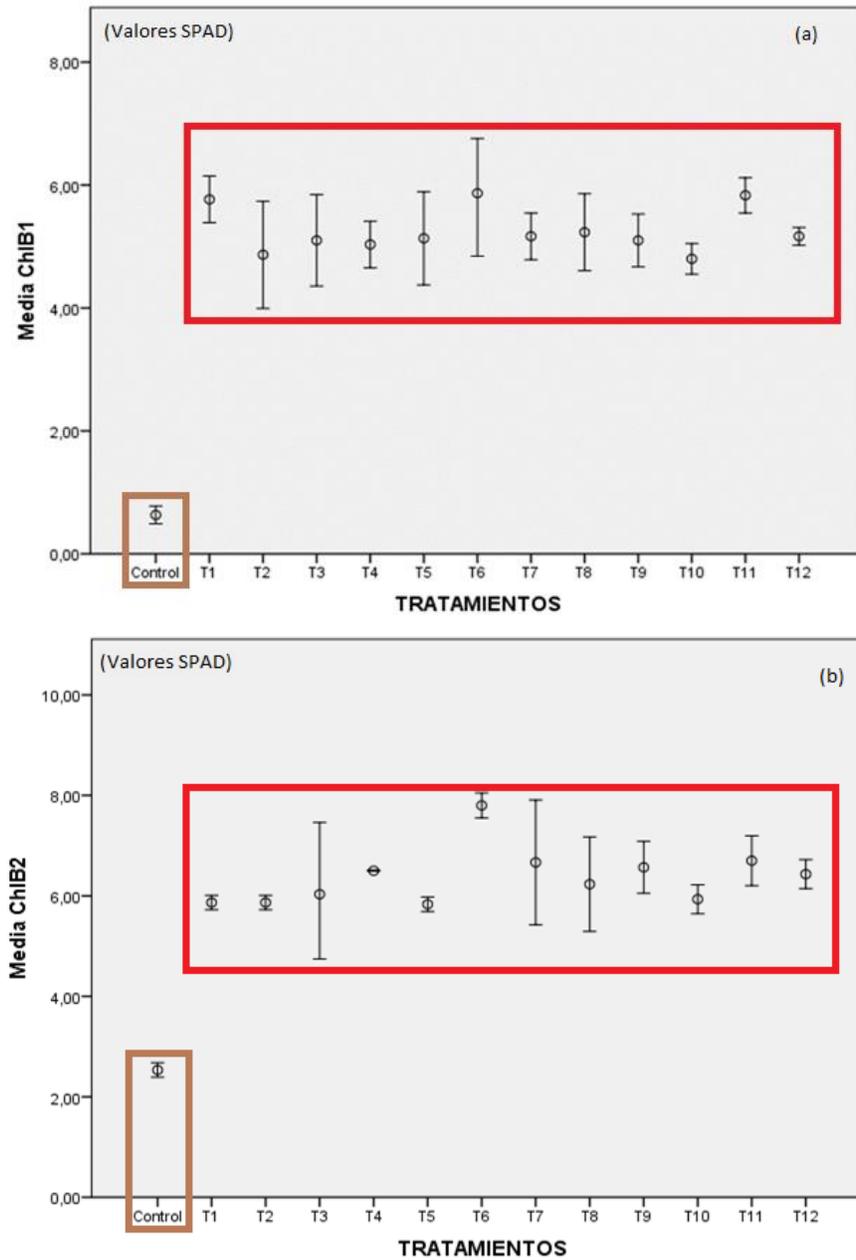
Al analizar la síntesis de pigmentos, esta se ha separado en clorofilas A, clorofilas B y totales. Así, las figuras 17 a la 19 evidencian el comportamiento del contenido de dichas clorofilas (A, B y Totales) en los dos momentos de evaluación como se explica en la metodología, dejando claro el efecto del tratamiento electromagnético sobre la síntesis de pigmentos. Es así como todos los tratamientos muestran valores muy superiores al control, diferenciándose en todos los casos significativamente de éste.

Así mismo, cabe destacar que el contenido de pigmentos fotosintéticos por unidad de superficie de las hojas constituye uno de los indicadores de la capacidad fotosintética de las plantas, ya que representa una medida de las dimensiones del sistema fotosintético y de su eficiencia, que determina la producción de biomasa de la planta en diferentes condiciones.



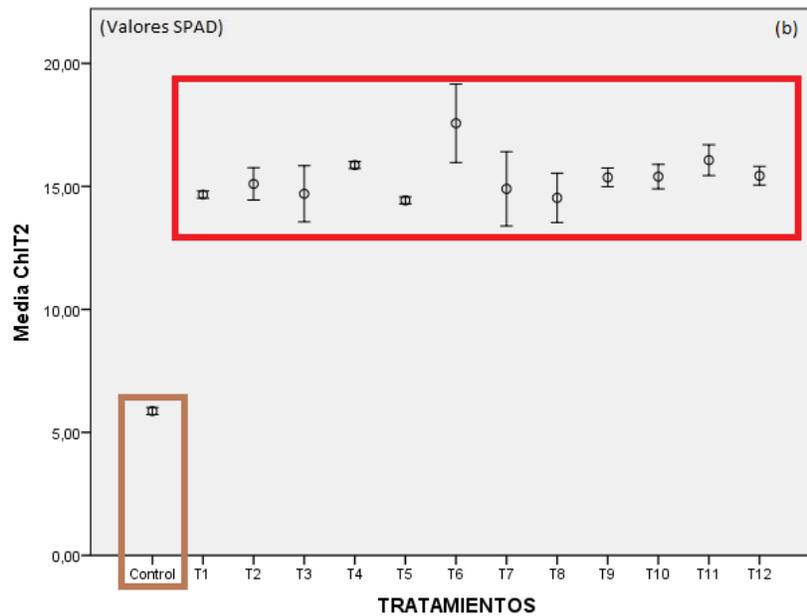
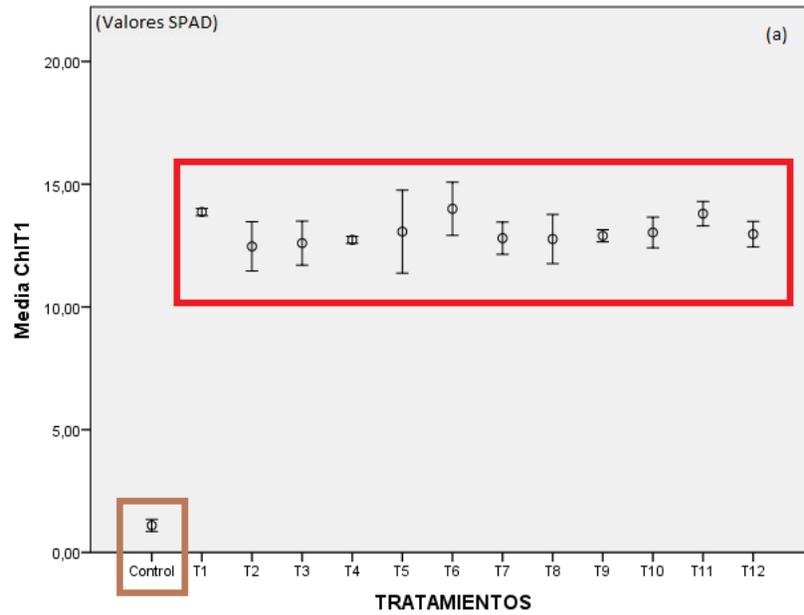
**Figura 17.** Comportamiento del contenido de Clorofila A en dos momentos. (La figura a se corresponde con el momento 1 y la figura b se corresponde al momento 2, ambas con barras de error de 95% IC).

Fuente: Propia.



**Figura 18.** Comportamiento del contenido de Clorofila B en dos momentos. (La figura a se corresponde con el momento 1 y la figura b se corresponde al momento 2, ambas con barras de error de 95% IC).

Fuente: Propia.



**Figura 19.** Comportamiento del contenido de Clorofila Total en dos momentos. (La figura a se corresponde con el momento 1y la figura b se corresponde al momento 2, ambas con barras de error de 95% IC).

Fuente: Propia.

La importancia de analizar los pigmentos fotosintéticos radica en la relación entre su contenido y la radiación fotosintéticamente activa (Dow y Bergmann, 2014), para la transformación de la energía lumínica en química a diferentes longitudes de onda según los receptores lumínicos en el fotosistema 1 (P700) y fotosistema 2 (P680); lo que permite una mayor tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> y síntesis de esqueletos carbonados.

Cabe resaltar que, la acumulación de materia seca en el cultivo del maíz evaluado, como en todas las plantas superiores, depende principalmente del total de carbono fijado, obedeciendo así no solamente a la intercepción de radiación fotosintéticamente activa, sino a la capacidad que tenga el dosel del cultivo para captarlo. En consonancia con lo anterior, Zibetti-Fornari, et al. (2020) apuntan que las clorofilas, unidas a los carotenoides deben ser considerados pigmentos fotosintéticos capaces de absorber la energía lumínica, la que luego será transmitida a las fases fotoquímica y bioquímica de la fotosíntesis. Así mismo los autores señalan que esta energía podrá ser almacenada en forma de azúcar. De las anteriores aseveraciones puede presumirse que los niveles de pigmentos fotosintéticos que se presentan en las plantas que fueron tratadas con CEM, son un parámetro que facilita el posterior entendimiento del rendimiento del cultivo.

### **5.3. Efectos sobre las variables de crecimiento y desarrollo del cultivo**

Las figuras 11 a la 16 mostraron el comportamiento de la biomasa fresca y seca, así como del comportamiento en materia de longitud de la raíz y altura de la planta medidos en un intervalo de tiempo, siendo coherentes con lo que se evidencia en la tabla 7, siendo el T8 uno de los que mejor conducta en materia de desarrollo vegetal presenta, aunque es superado significativamente por el T12 para la TCC, TAC y la TAN. Lo anterior evidencia que las semillas que fueron inducidas con CEM reaccionaron positivamente a este estímulo, para los indicadores evaluados, lo cual está estrechamente relacionado con las figuras 17 a la 19, referentes a la síntesis de pigmentos fotosintéticos. Por otro lado, los valores de masa seca en el momento final del experimento para el tratamiento T12 (118 μT con exposición permanente por 15 días) superaron en 5.53 veces a las plantas control, por lo que cabe destacar que la acumulación de biomasa depende de la cinética de crecimiento y de la tasa de distribución, además de los parámetros que se rigen por el área foliar, el clima y la disponibilidad de nutrientes.

Por otro lado, es de destacar que el rendimiento de un cultivo está dado por la capacidad de acumular biomasa en forma de materia fresca y seca en los órganos que se destinan a la cosecha, un aumento proporcional de la biomasa asignada a estos órganos asegura un aumento del rendimiento. De esta manera Barrientos-Llanos, et al. (2015) señalan que la distribución de la materia seca entre los diferentes órganos de la planta juega un papel fundamental en la producción de un cultivo. Los asimilados o asimilatos (hidratos de carbono, proteínas, lípidos y carbohidratos) producidos por la fotosíntesis en los órganos "fuente" (principalmente las hojas), pueden ser almacenados o distribuidos vía floema entre los diferentes órganos "sumideros" de una planta. Así, para conseguir un rápido crecimiento inicial de las plantas jóvenes, es importante aumentar sustancialmente la superficie foliar en esta fase, ya que una gran parte de la radiación solar incidente no es interceptada. Por lo tanto, en este momento, una gran parte de los asimilados debe destinarse a la formación de las hojas. Hussaina, et al. (2016) afirma que los estudios fenológicos permiten comprender claramente el comportamiento de una planta en relación con el tiempo, y a partir de ello obtener un mayor conocimiento sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas y sus diferentes etapas. En las plantas, los procesos de crecimiento y desarrollo son eventos irreversibles, los cambios de tamaño, número, masa y forma son evidentes. Estos parámetros y sus respectivas modificaciones son el resultado de la interacción del genotipo y el medio ambiente. Lo anterior tiene como consecuencia el aumento cuantitativo de tamaño y peso en los vegetales, debido principalmente a la división y elongación celular, facilitada por los procesos fotosintéticos, respiratorios y por la dinámica que genera la planta con la absorción, transporte y transpiración de agua y nutrientes (Taiz y Zeiger, 2010; Tadeu, et al., 2015).

En el anterior orden de ideas, a continuación, la tabla 7 refleja el comportamiento interno, es decir, desde el punto de vista fisiológico, de las plantas de maíz bajo estudio según muestra seleccionada. Así, los indicadores de desarrollo permiten visualizar e interpretar en mayor grado lo que ocurre más allá de la frontera visual del ojo humano, llevando al entendimiento en materia de conversión y distribución de los asimilatos producidos por la planta y la medida en que la modificación de factores externos, como lo son los campos electromagnéticos, actúa sobre la eficiencia metabólica.

**Tabla 7.** Indicadores fisiológicos calculados como medida del desarrollo vegetal.

TRAT.	TCR (g/(g día))	TAN (g/(cm <sup>2</sup> día))	IAF	TCC (g/(cm <sup>2</sup> día))	TAC (g/día)	DAF (cm <sup>2</sup> /día)	AFE (cm <sup>2</sup> /g)
Control	0,128 <sup>cde</sup> ±0,09	0,045 <sup>a</sup> ±0,01	44,18 <sup>a</sup> ±0,12	0,0021 <sup>a</sup> ±0,001	0,010 <sup>a</sup> ±0,002	16,34 <sup>a</sup> ±0,02	87,81 <sup>a</sup> ±0,55
T1	0,127 <sup>cde</sup> ±0,03	0,689 <sup>cd</sup> ±0,35	278,65 <sup>bc</sup> ±0,84	0,0064 <sup>b</sup> ±0,002	0,032 <sup>b</sup> ±0,011	63,23 <sup>bc</sup> ±0,17	118,78 <sup>a</sup> ±0,50
T2	0,137 <sup>de</sup> ±0,02	0,546 <sup>bcd</sup> ±0,14	188,04 <sup>ab</sup> ±0,56	0,0076 <sup>b</sup> ±0,003	0,038 <sup>b</sup> ±0,014	45,11 <sup>ab</sup> ±0,11	78,20 <sup>a</sup> ±0,35
T3	0,133 <sup>cde</sup> ±0,01	0,558 <sup>bcd</sup> ±0,14	184,05 <sup>ab</sup> ±0,41	0,0074 <sup>b</sup> ±0,001	0,037 <sup>b</sup> ±0,003	44,31 <sup>ab</sup> ±0,08	70,46 <sup>a</sup> ±0,12
T4	0,128 <sup>cde</sup> ±0,03	0,735 <sup>cd</sup> ±0,38	312,07 <sup>bc</sup> ±0,62	0,0064 <sup>b</sup> ±0,003	0,032 <sup>b</sup> ±0,014	69,91 <sup>bc</sup> ±0,12	155,07 <sup>ab</sup> ±0,74
T5	0,084 <sup>abc</sup> ±0,02	0,403 <sup>abc</sup> ±0,21	411,74 <sup>bcd</sup> ±0,20	0,0028 <sup>a</sup> ±0,001	0,014 <sup>a</sup> ±0,003	89,85 <sup>bcd</sup> ±0,39	329,37 <sup>bc</sup> ±0,15
T6	0,074 <sup>ab</sup> ±0,02	0,190 <sup>ab</sup> ±0,01	216,96 <sup>ab</sup> ±0,13	0,0021 <sup>a</sup> ±0,001	0,011 <sup>a</sup> ±0,001	50,89 <sup>ab</sup> ±0,03	207,83 <sup>ab</sup> ±0,37
T7	0,084 <sup>abc</sup> ±0,03	0,472 <sup>abcd</sup> ±0,33	478,88 <sup>cd</sup> ±0,20	0,0027 <sup>a</sup> ±0,002	0,013 <sup>a</sup> ±0,007	103,28 <sup>cd</sup> ±0,36	435,07 <sup>c</sup> ±0,47
T8	0,076 <sup>abc</sup> ±0,01	0,471 <sup>abcd</sup> ±0,28	585,08 <sup>d</sup> ±0,33	0,0025 <sup>a</sup> ±0,001	0,012 <sup>a</sup> ±0,002	124,51 <sup>d</sup> ±0,67	487,02 <sup>c</sup> ±0,27
T9	0,150 <sup>e</sup> ±0,01	0,930 <sup>d</sup> ±0,27	305,40 <sup>bc</sup> ±0,29	0,0087 <sup>b</sup> ±0,002	0,043 <sup>b</sup> ±0,009	68,58 <sup>bc</sup> ±0,06	100,96 <sup>a</sup> ±0,16
T10	0,042 <sup>a</sup> ±0,02	0,344 <sup>abc</sup> ±0,22	362,18 <sup>bcd</sup> ±0,51	0,0026 <sup>a</sup> ±0,002	0,013 <sup>a</sup> ±0,007	79,94 <sup>bcd</sup> ±0,10	206,39 <sup>ab</sup> ±0,59
T11	0,043 <sup>a</sup> ±0,02	0,346 <sup>abc</sup> ±0,24	314,90 <sup>bc</sup> ±0,38	0,0029 <sup>a</sup> ±0,002	0,015 <sup>a</sup> ±0,010	70,487 <sup>bc</sup> ±0,08	158,51 <sup>ab</sup> ±0,24
T12	0,080 <sup>abc</sup> ±0,08	1,500 <sup>e</sup> ±0,18	579,14 <sup>d</sup> ±0,49	0,0077 <sup>b</sup> ±0,001	0,039 <sup>b</sup> ±0,005	123,33 <sup>d</sup> ±0,10	201,77 <sup>ab</sup> ±0,15

(Letras iguales no hay diferencia significativa, letras diferentes hay diferencia significativa. Nivel de significancia del 0.05)

Estos resultados confirman lo mencionado por Moreno-Medina, et al. (2016), quienes describen que el estudio del crecimiento de las plantas y su posterior análisis permite relacionar la ecofisiología y la agronomía para mejorar las actividades de manejo en los cultivos. Estos autores también señalan que el TCR y el TAN deben ser vistos como indicadores de la relación fuente-vertedero, lo cual es importante para establecer actividades agronómicas tendientes a aumentar la cantidad de biomasa o estructura vegetal en un período determinado por unidad de superficie.

Por otra parte, la acumulación de materia seca en una planta o población de estas, cultivadas o no, reflejan una dependencia, principalmente del total de carbono que sea capaz de captar, obedeciendo a la intercepción de radiación fotosintéticamente activa y con ello al uso eficiente por parte del dosel que es capaz de desarrollar el cultivo. En el anterior orden de ideas, dicha intercepción estará determinada (su eficiencia) en primer lugar por el índice de área foliar (IAF), el que es considerado como un indicador de eficiencia de intercepción de la radiación; mientras que la eficiencia fisiológica en el uso de esta radiación será determinada indirectamente a

través de la tasa de asimilación neta (TAN) que corresponde a la ganancia neta de asimilados por unidad de área foliar en un tiempo determinado.

Así, tanto el IAF y la TAN son componentes de la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) que mide la ganancia de materia seca en un cultivo o grupo de plantas en un área específica (Hay y Porter, 2006), lo que concuerda con los resultados obtenidos en materia de aceleración del crecimiento, desarrollo foliar, y que posteriormente se observará en materia de rendimientos del cultivo con aplicación de los CEM. Estos componentes fisiológicos (IAF y TAN) se verán afectados por la absorción de agua y nutrientes mediante el sistema radicular (por la raíz), por lo que al presentarse algún agente estresante que afecte el proceso de absorción y régimen nutricional, se puede afectar por ende la captura de radiación y su eficiencia en la producción y acumulación de biomasa (Tollenaar, et al., 2006).

#### **5.4. Efectos sobre la productividad (rendimiento y calidad) del cultivo**

Cuando se analiza el término productividad, es común que se enfoque en torno al rendimiento del cultivo. En este apartado se hace un abordaje en torno al rendimiento, describiendo la mazorca en conjunto (infrutescencia), cada una de sus partes (peso total de la mazorca con amero, peso de la tusa, peso de los frutos, número de hileras y el rendimiento, este último tanto cosechada con el amero y tomando como referente solamente el peso de los frutos. No obstante, en materia de calidad se hace descripción con la aplicación de tecnología avanzada del almidón que se contiene dentro de los frutos (cariópside), evidenciando que el tratamiento con CEM no afecta dichas propiedades.

##### **5.4.1. Análisis de componentes de la productividad en torno al rendimiento**

Para las variables descriptivas de la mazorca (ver tabla 8), exceptuando el peso de la tusa (PT), el control (mazorcas provenientes de plantas no tratadas con CEM) mostró los valores más bajos, difiriendo significativamente de los tratamientos. Es de destacar para la variable NH que, aunque algunos tratamientos muestran diferencias significativas, al menos 6 no las mostraron respecto al control; en tal sentido, esta variable en particular se ve poco influenciada por los tratamientos con CEM. Unido a lo anterior, respecto al PT, los valores más bajos se presentaron en el T4 (23  $\mu$ T expuesto permanente por 15 días), difiriendo significativamente del

resto de tratamientos y el control, aunque es de mencionar que este menor peso en la tusa no afectó significativamente el rendimiento respecto al control.

Por otra parte, al analizar la significancia de las variables bajo estudio, puede apreciarse que, excepto para el NH, los mayores valores se presentaron en el T12 (118  $\mu$ T expuesto permanente durante 15 días) quien difiere de todos los tratamientos y el control. Para la variable “rendimiento en peso (t) de mazorca por hectárea (ha) para un maíz bajo laboreo mínimo, como se aprecia en la metodología, los rendimientos del control (2,46  $\pm$ 0,2 t ha<sup>-1</sup>) se encuentran por encima de la media nacional para maíz amarillo bajo sistema de cultivo tradicional (2,11 t ha<sup>-1</sup> según FENALCE, 2022). Así mismo, la Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya de Colombia (FENALCE) señala que para este mismo tipo de maíz (maíz amarillo) cuando se cultiva de forma tecnificada, la media nacional para el año 2021 fue de 5,52 t ha<sup>-1</sup>, ubicando al rendimiento del control por debajo de este valor, no obstante, es de destacar que el control mantuvo una conducta productiva en el intervalo de maíz amarillo cultivado tradicional y tecnificadamente, lo que soporta la veracidad de los resultados obtenidos y permite establecer comparación con los tratamientos fijados previamente.

Luego de comparado el rendimiento del control con los datos reportados por FENALCE (2022) para maíz amarillo durante el año 2021, se puede evidenciar en la tabla 8 que los CEM, indistintamente de su tiempo de exposición e intensidad, impactaron positivamente la variable rendimiento del cultivo. Todos los tratamientos difieren significativamente del control, pero el rendimiento más elevado se presentó en el T12 (118  $\mu$ T permanentes durante 15 días) con 17,64  $\pm$ 0,3 t ha<sup>-1</sup>, evidentemente un rendimiento 7 veces mayor que el control. Es de señalar que los mayores rendimientos se obtuvieron a la mayor intensidad del CEM, mostrándose una conducta que deja en evidencia que, a mayores intensidades y tiempos de exposición a los CEM, mayores son los rendimientos del cultivo, mucho más marcado en los tratamientos T9 al T12 (118  $\mu$ T en sus 4 tiempos de exposición).

**Tabla 8.** Características de la mazorca y rendimiento del cultivo.

TRAT.	PA (g)	PT (g)	PGr (g)	NH	Rendimiento en peso de mazorca (t ha <sup>-1</sup> )	Rendimiento en peso de granos (t ha <sup>-1</sup> )
Control	61,57 <sup>a</sup> ±0,06	35,68 <sup>b</sup> ±0,02	25,89 <sup>a</sup> ±0,05	10,44 <sup>a</sup> ±0,7	2,46 <sup>a</sup> ±0,2	1,04 <sup>a</sup> ±0,2
T1	111,52 <sup>c</sup> ±0,14	38,09 <sup>b</sup> ±0,07	73,44 <sup>c</sup> ±0,09	10,78 <sup>ab</sup> ±0,9	4,46 <sup>c</sup> ±0,5	2,94 <sup>c</sup> ±0,4
T2	114,41 <sup>c</sup> ±0,04	41,93 <sup>c</sup> ±0,03	72,48 <sup>bc</sup> ±0,01	10,75 <sup>ab</sup> ±0,9	4,58 <sup>c</sup> ±0,2	2,90 <sup>bc</sup> ±0,1
T3	148,60 <sup>f</sup> ±0,09	56,40 <sup>f</sup> ±0,03	92,20 <sup>e</sup> ±0,07	11,50 <sup>bcd</sup> ±0,5	5,94 <sup>f</sup> ±0,4	3,69 <sup>e</sup> ±0,3
T4	98,40 <sup>b</sup> ±0,05	29,17 <sup>a</sup> ±0,06	69,23 <sup>b</sup> ±0,03	10,78 <sup>ab</sup> ±0,8	3,94 <sup>b</sup> ±0,2	2,77 <sup>b</sup> ±0,1
T5	154,03 <sup>g</sup> ±0,06	52,79 <sup>e</sup> ±0,03	99,40 <sup>f</sup> ±0,08	11,00 <sup>abc</sup> ±0,8	6,09 <sup>f</sup> ±0,4	3,98 <sup>f</sup> ±0,3
T6	132,06 <sup>e</sup> ±0,04	46,16 <sup>d</sup> ±0,04	85,89 <sup>d</sup> ±0,03	11,25 <sup>abcd</sup> ±0,5	5,28 <sup>e</sup> ±0,2	3,42 <sup>d</sup> ±0,1
T7	120,42 <sup>d</sup> ±0,04	37,99 <sup>b</sup> ±0,01	82,42 <sup>d</sup> ±0,03	11,75 <sup>bcd</sup> ±0,5	4,82 <sup>d</sup> ±0,2	3,30 <sup>d</sup> ±0,1
T8	196,15 <sup>i</sup> ±0,05	53,92 <sup>ef</sup> ±0,06	142,23 <sup>h</sup> ±0,04	11,85 <sup>cde</sup> ±0,9	7,85 <sup>h</sup> ±0,2	5,69 <sup>h</sup> ±0,2
T9	172,63 <sup>h</sup> ±0,04	47,66 <sup>e</sup> ±0,11	124,97 <sup>g</sup> ±0,13	12,73 <sup>e</sup> ±0,7	6,90 <sup>g</sup> ±0,3	5,00 <sup>g</sup> ±0,5
T10	225,84 <sup>j</sup> ±0,02	82,07 <sup>g</sup> ±0,01	143,77 <sup>h</sup> ±0,01	12,00 <sup>de</sup> ±0,8	9,03 <sup>i</sup> ±0,1	5,75 <sup>h</sup> ±0,1
T11	297,80 <sup>k</sup> ±0,03	127,23 <sup>h</sup> ±0,02	170,58 <sup>i</sup> ±0,02	12,23 <sup>de</sup> ±0,9	11,91 <sup>j</sup> ±0,1	6,82 <sup>i</sup> ±0,1
T12	440,95 <sup>l</sup> ±0,06	242,10 <sup>i</sup> ±0,03	198,84 <sup>j</sup> ±0,07	12,47 <sup>bcd</sup> ±0,9	17,64 <sup>k</sup> ±0,3	7,96 <sup>j</sup> ±0,2

(Letras iguales no hay diferencia significativa, letras diferentes hay diferencia significativa. Nivel de significancia del 0.05)

Los resultados de rendimiento guardan una estrecha relación con el desarrollo del aparato fotosintético, tal como se apreció en las figuras 17 a la 19. Para el caso de la síntesis de pigmentos fotosintéticos se encontró un estímulo significativo respecto al control, lo que podría traducirse en mayor eficiencia al desarrollar la fotosíntesis y ser uno de los factores determinantes en el rendimiento del cultivo. En este orden de ideas, Antonietta (2012), señala que la producción de fotoasimilatos durante la etapa reproductiva del cultivo (floración – fructificación) se va a caracterizar por la generación de un mayor aporte de materia seca al rendimiento final. Así mismo, autores como Pietruszewski y Martínez (2015) y Carbonell, et al. (2017) coinciden en que el efecto del campo magnético sobre el rendimiento de las plantas cultivadas es variado, dependiendo principalmente de la intensidad y tiempo de exposición, la especie y el cultivar o variedad. Así mismo, Zepeda-Bautista, et al. (2019), acotan que, con el uso de campos electromagnéticos, en sus estudios en maíz, obtienen un incremento de 800, 600 y 2300 kg ha<sup>-1</sup> de grano, lo que representa una ganancia directa para el productor con la aplicación de un método biofísico amigable con el ambiente.

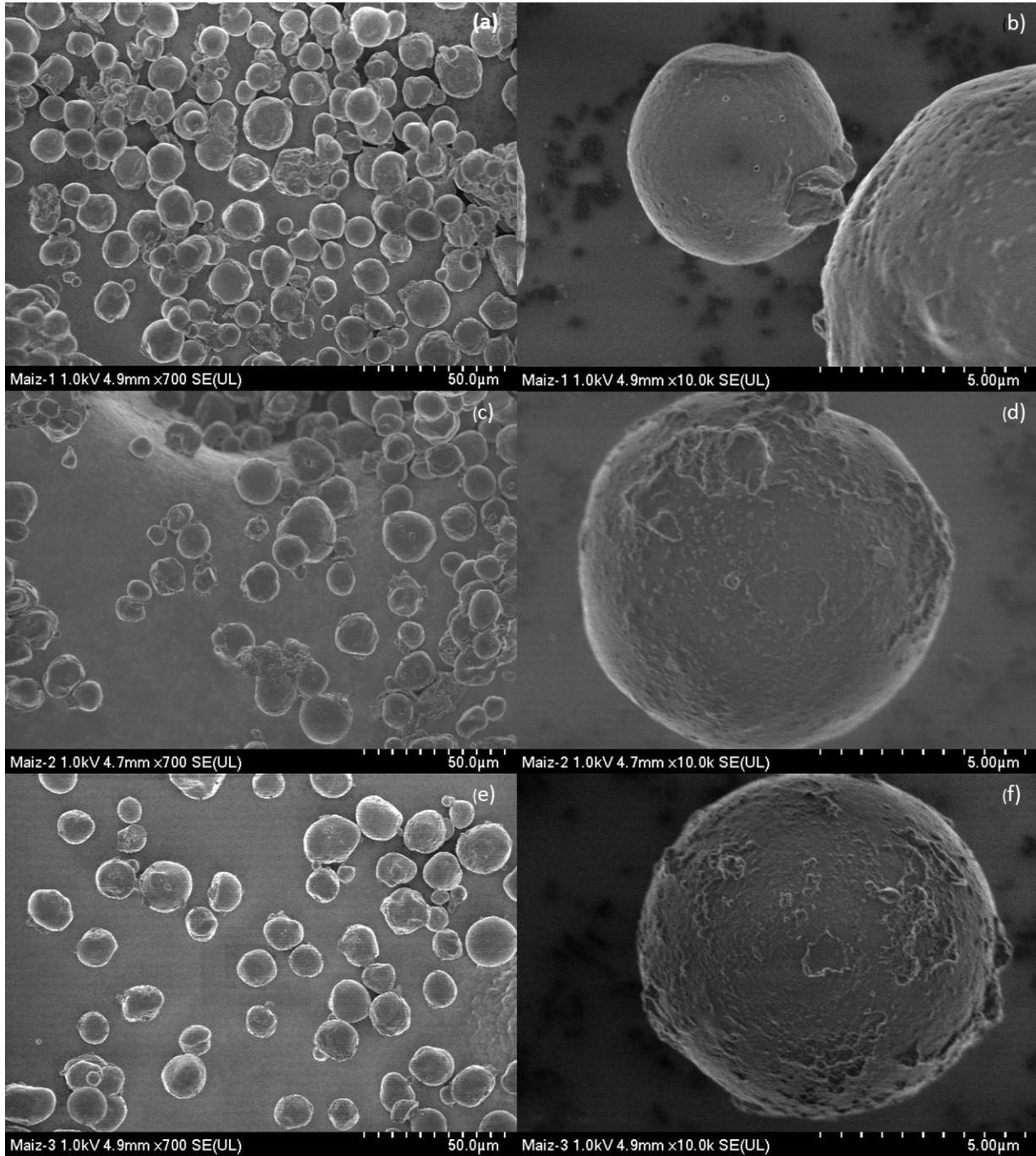
Sin embargo, es de resaltar que aún existe poca información sobre el efecto del campo electromagnético en el establecimiento de plántulas, crecimiento y producción de maíz en condiciones de campo (Pietruszewski y Martínez, 2015). No obstante, en otros cultivos como el trigo, se observó un incremento entre el 12 y 14 % en el rendimiento con la exposición a campo magnético a una dosis de 12.9 y 17.9 kJ (ms)<sup>-1</sup>, según reportaron Pietruszewski y Kania (2010) en comparación con plantas control, así mismo, Iqbal, et al., (2013) reportaron para el cultivo del chícharo una mayor producción de vaina verde por planta y por hectárea con la exposición de 5 min a una intensidad de 180 mT.

## **5.4.2. Caracterización del almidón**

### **a) Morfología del grano de almidón**

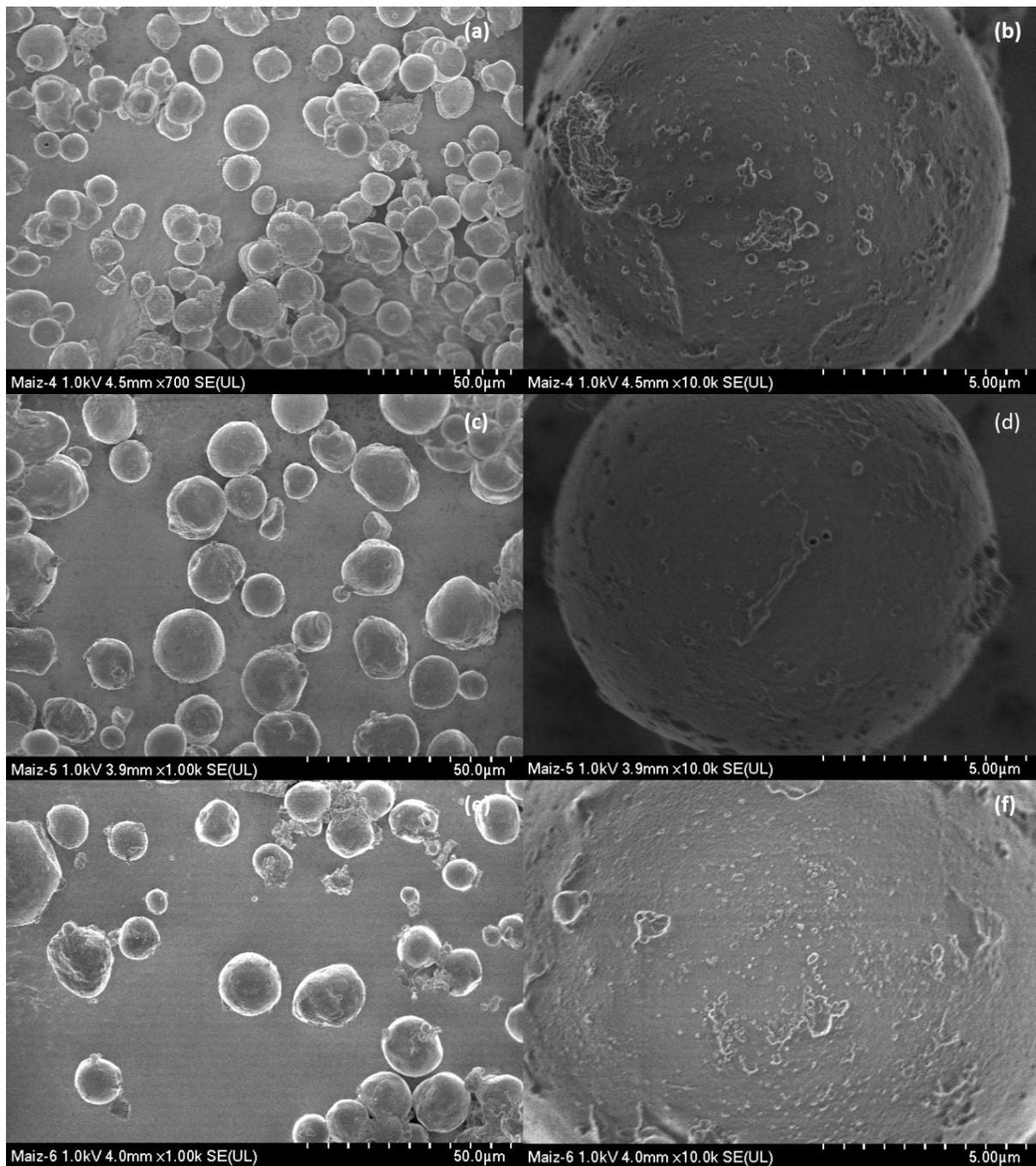
Las figuras 20 a la 24 muestran imágenes tomadas por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de almidones de plantas cuyas semillas fueron tratadas previamente con CEM a diferentes intensidades y durante varios tiempos de exposición, así como los almidones de las plantas control. En la descripción del análisis morfológico por MEB, se observa una tendencia similar (distribución uniforme) en cada una de las micrográficas de mayor amplitud (5.00 μm), destacando tanto que tanto en el control, como en los tratamientos inducidos con campos electromagnéticos (23 μT, 70 μT y 118 μT), hay presencia de orificios sobre la superficie del granulo, los que se encuentran asociados a una degradación enzimática. Al respecto, Agama-Acedevó, et al. (2011) describieron estos poros como una evidencia de la resistencia a la digestión enzimática propia de estos almidones, lo que repercute en las propiedades de digestibilidad de este y de los productos que puedan ser elaborados con estos maíces.

Al comparar las formas del gránulo, se destaca que los gránulos de almidón, indistintamente del tratamiento de procedencia o control, presentaron formas esféricas, pudiendo corroborar ello en las figuras 20 a la 24, guardando una estrecha relación con sus propiedades funcionales. Al respecto Agama, et al. (2013) señalan que los gránulos de almidón son responsables de las propiedades de textura en los productos elaborados con este cereal, así mismos estudios realizados por Cervantes-Ramírez, et al. (2020), concuerdan con el anterior planteamiento y aseveran que la forma y tamaño del granulo tendrán influencia en las propiedades funcionales, como por ejemplo composición química, susceptibilidad enzimática, cristalinidad, gelatinización, propiedades de formación de pasta, hinchamiento y solubilidad.

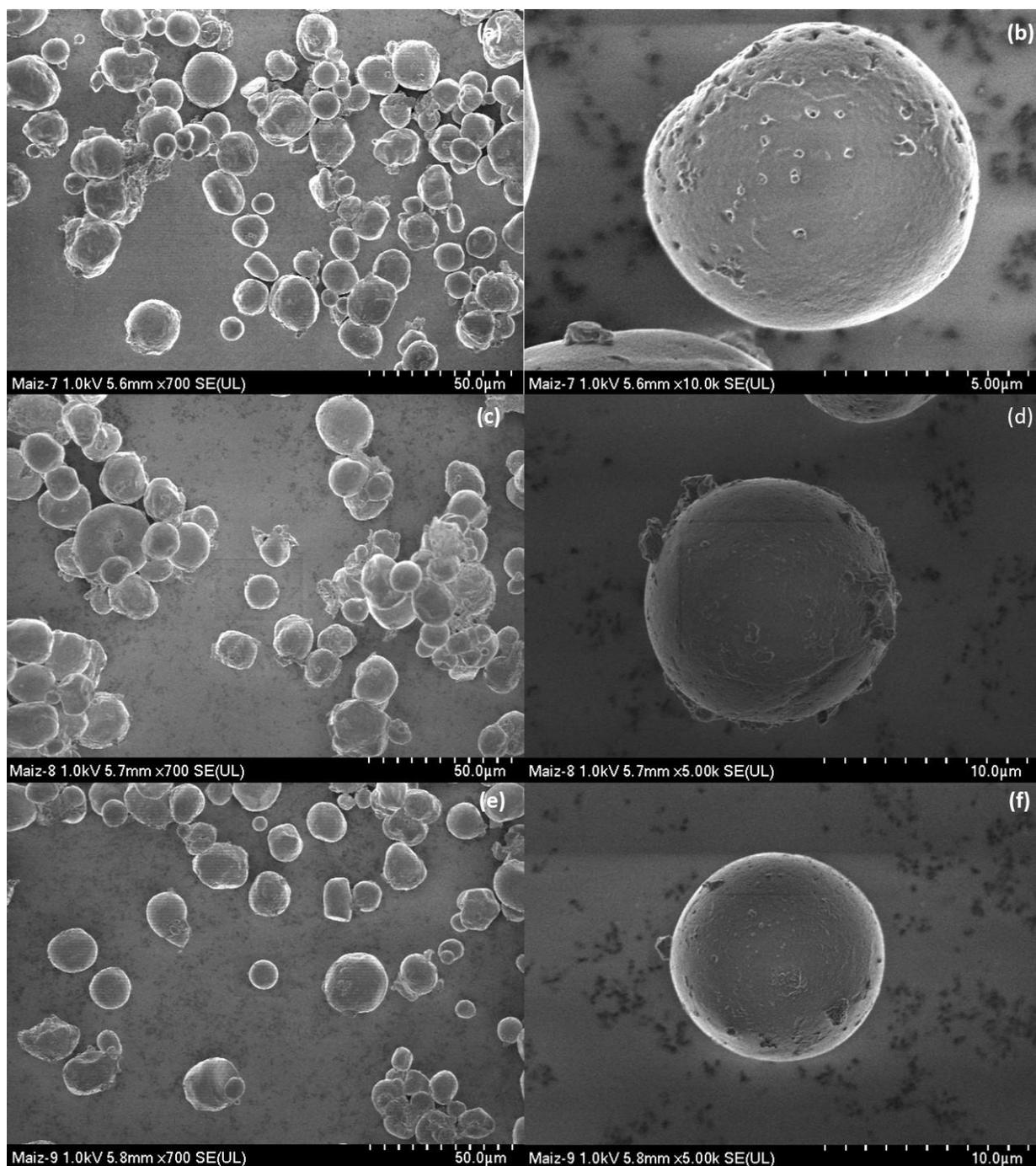


**Figura 20.** Imágenes por MEB de almidones de maíz de la variedad Porva procedentes de plantas tratadas con CEM. a y b: Control; c y d: tratamiento T1; e y f: tratamiento T2.

Fuente: Propia.

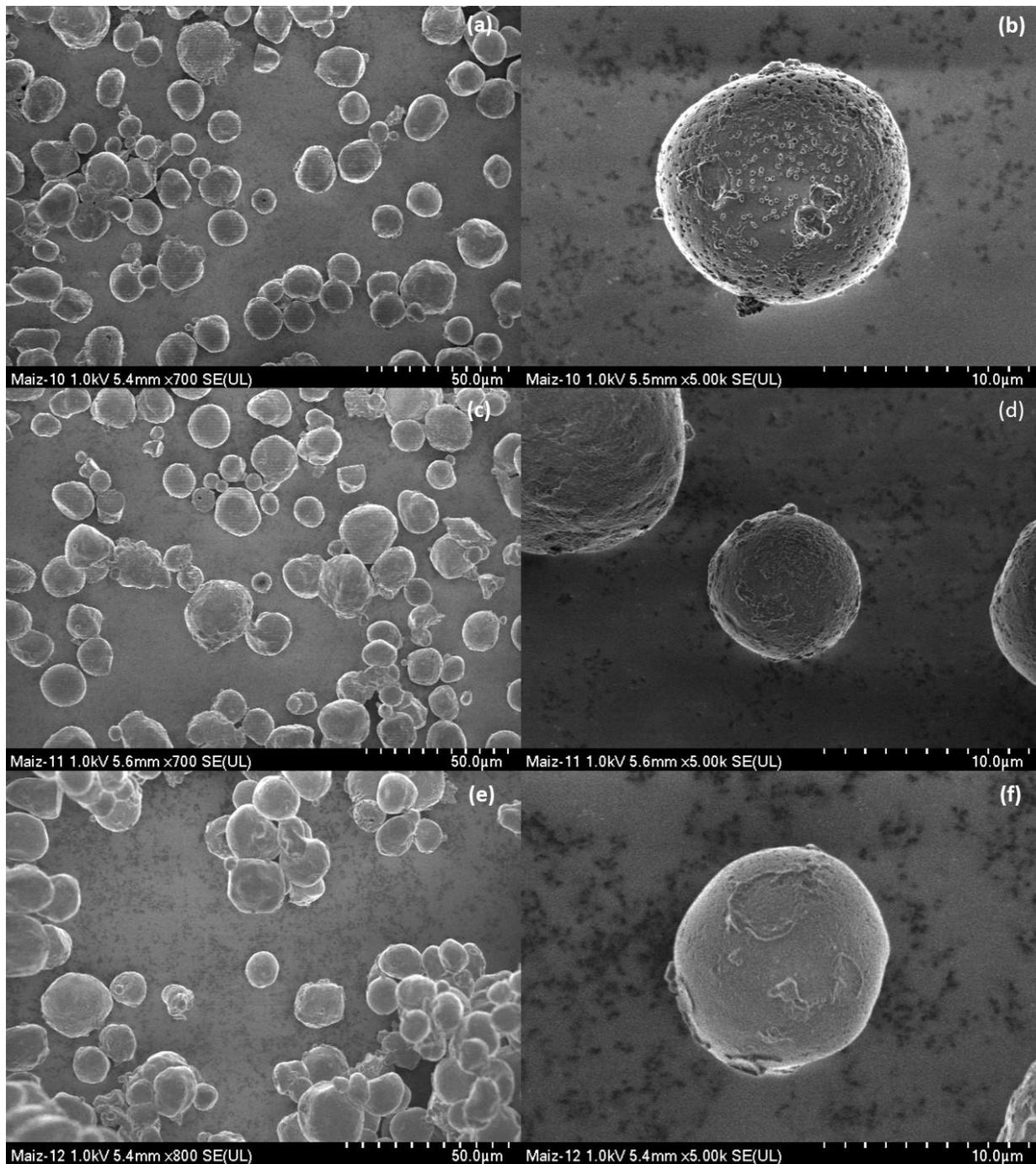


**Figura 21.** Imágenes por MEB de almidones de maíz de la variedad Porva procedentes de plantas tratadas con CEM. a y b: tratamiento T3; c y d: tratamiento T4; e y f: tratamiento T5.  
Fuente: Propia.

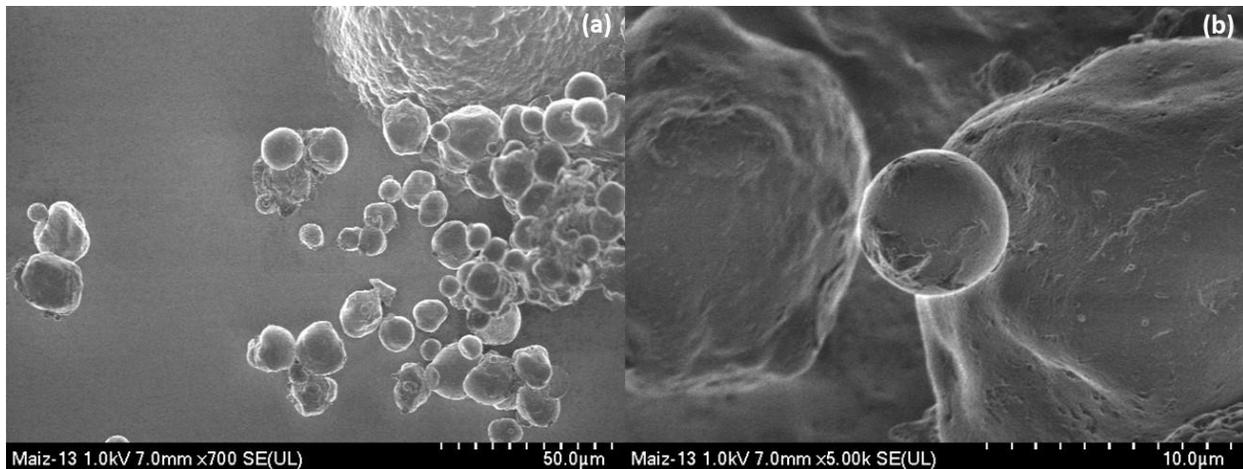


**Figura 22.** Imágenes por MEB de almidones de maíz de la variedad Porva procedentes de plantas tratadas con CEM. a y b: tratamiento T6; c y d: tratamiento T7; e y f: tratamiento T8.

Fuente: Propia.



**Figura 23.** Imágenes por MEB de almidones de maíz de la variedad Porva procedentes de plantas tratadas con CEM. a y b: tratamiento T9; c y d: tratamiento T10; e y f: tratamiento T11. Fuente: Propia.

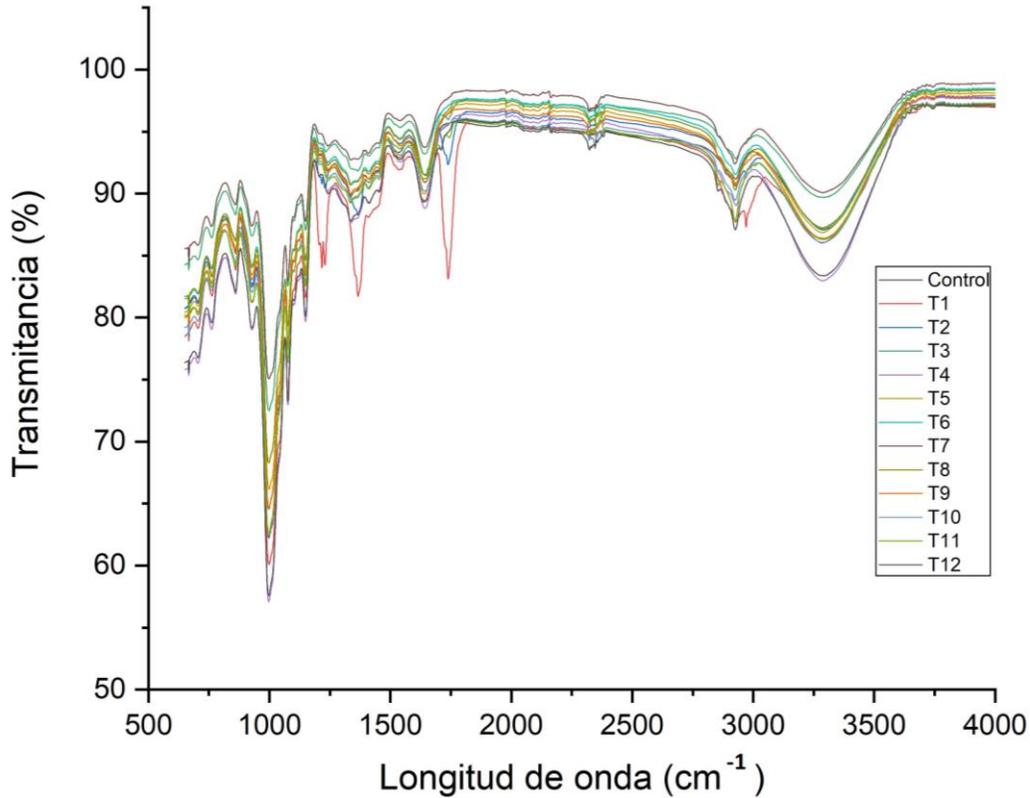


**Figura 24.** Imágenes por MEB de almidones de maíz de la variedad Porva procedentes de plantas tratadas con CEM. a y b: tratamiento T12.

Fuente: Propia.

### **b) Espectroscopía de Infrarrojo del almidón (FT - IR)**

Como se refiere en la metodología, para la caracterización del almidón de maíz por FT - IR se partió del principio que señala el estudio de espectroscopía de Infrarrojo con transformada de Fourier como aquel que se basa en los enlaces químicos de las sustancias las cuales tienen frecuencias de vibración específicas de los niveles de energía de la molécula (Ticona-Quea, 2019) y estas dependen de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y el acoplamiento vibracional. Por lo anterior la implementación de la técnica espectroscopia infrarroja permitió identificar los grupos funcionales presentes en las muestras de almidón obtenidos de los diferentes tratamientos del presente estudio y su comparación con el control. Es importante resaltar que los resultados obtenidos se analizaron en OriginPro 2018 para obtener los espectros. Dado el número de espectros, correspondientes a 12 tratamientos y el control, se describirá en adelante cada uno de los elementos distintivos del mismo.



**Figura 25.** Espectros FT - IR de almidón de plantas tratadas con campos electromagnéticos y de control.

Fuente: Propia.

En los espectros de infrarrojo correspondientes a la figura 25, muestran las vibraciones moleculares en la región de los 500 a los 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Como se puede observar los espectros de absorción diferenciales obtenidos en este estudio se registraron en la región espectral de 650 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ , evidenciándose ligeras variaciones respecto al análisis sobre el control. Por su parte, la banda amplia que aparece a 3421  $\text{cm}^{-1}$  es debida a los estiramientos de los enlaces H-O de los grupos hidroxilos presentes en la molécula de almidón (Guerra-del Valle, et al., 2008; Rodríguez-García, et al., 2021). Por otra parte, el mismo espectro FT - IR del almidón mostró nuevas señales de absorción a 1754, 1435, 1375 y 1240  $\text{cm}^{-1}$ , que han sido asignadas a la vibración de deformación antisimétrica de los grupos carbonilos (C=O) la vibración antisimétrica / simétrica de los grupos  $\text{CH}_3$  y las vibraciones de estiramiento del grupo carbonilo (C-O), respectivamente.

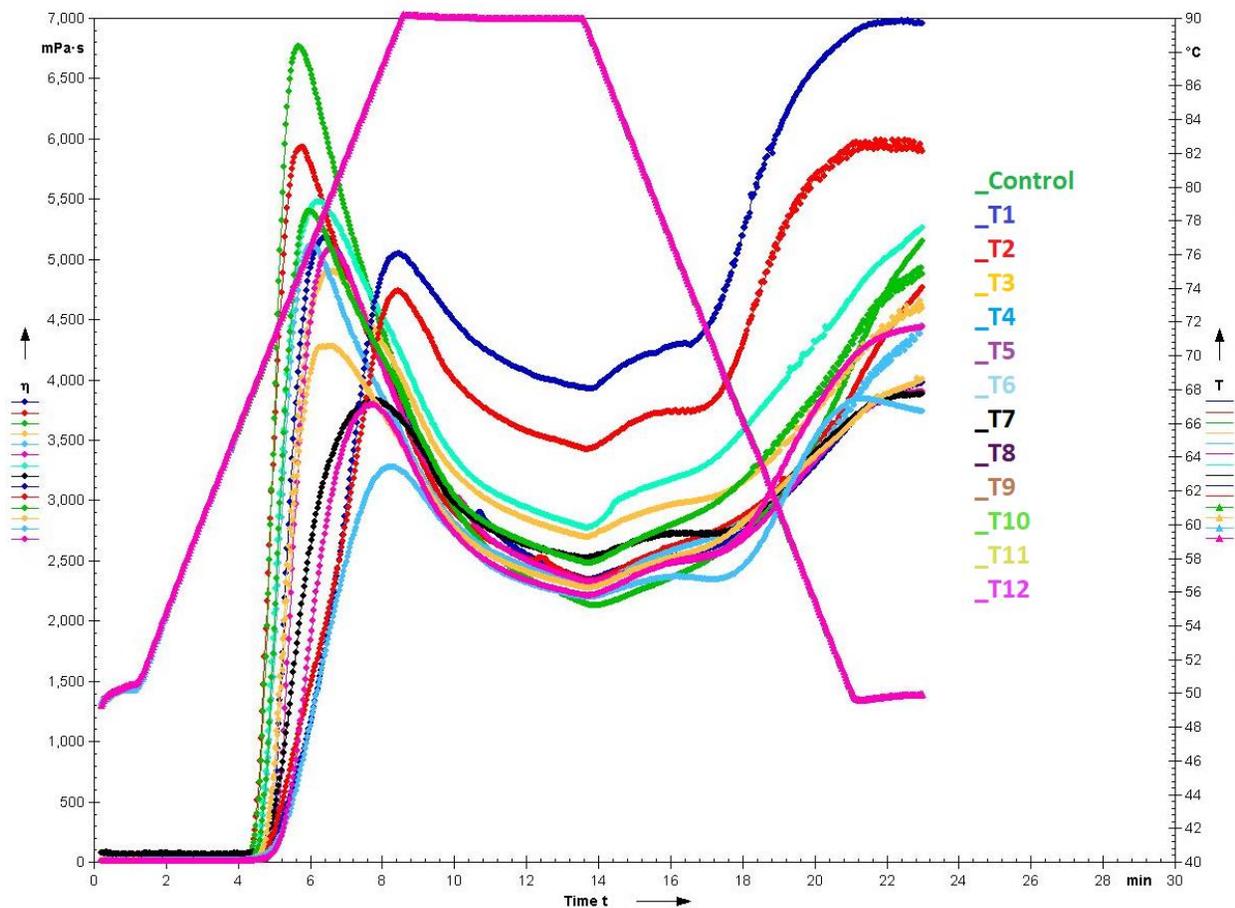
La señal observada a  $2900\text{ cm}^{-1}$ , es característica a las vibraciones de los enlaces C-H de los grupos metilos asociados con el anillo de glucopiranososa (Flores, et al., 2014), la absorción de  $1640\text{-}1645\text{ cm}^{-1}$  refleja un pico de baja intensidad de estiramiento H-O-H particular del agua presente en el almidón (porcentaje de agua bajo), en cuanto a la región de la huella dactilar espectral que corresponde a lo comprendido en la región de absorción de  $1500\text{ a }600\text{ cm}^{-1}$ , se encuentran las vibraciones de flexión de los enlaces C-H y C-C de las cadenas hidrocarbonadas de los lípidos, carbohidratos y proteínas como globulina, prolamina, la glutenina, entre otras.

Adicional se observa en el espectro obtenido del almidón (Figura 25) se observaron señales a números de onda de  $1159$ ,  $1082$  y  $1014\text{ cm}^{-1}$ , que son atribuidas a los estiramientos de los enlaces C-O, así mismo, se presentan otras señales de absorción características a  $992$ ,  $929$ ,  $861$ ,  $765$  y  $575\text{ cm}^{-1}$  debido a las vibraciones de estiramiento del anillo de anhidroglucosa (Rodríguez-García, et al., 2021).

Todo lo anterior, dadas las semejanzas entre los espectros, permite señalar que no hay diferencia significativa entre los comportamientos de cada uno de ellos según el tratamiento y el control, lo que concluye semejanza en la composición química de los almidones estudiados.

### **c) Perfil de viscosidad**

La modificación del almidón es uno de los campos más importantes en la alimentación para dar a un almidón una aplicación diferente. La figura 26 muestra el perfil de viscosidad del almidón aislado para los diferentes tratamientos y el control. Si el campo electromagnético aumenta, los perfiles de viscosidad presentan comportamientos diferentes, el efecto neto es la reducción del pico de viscosidad, pero sin salirse de la dinámica particular de la especie. En este sentido, el perfil de pegado según Esquivel-Fajardo, et al. (2022) depende de los parámetros intrínsecos y extrínsecos.



**Figura 26.** Perfil de viscosidad aparente.

Fuente: Propia.

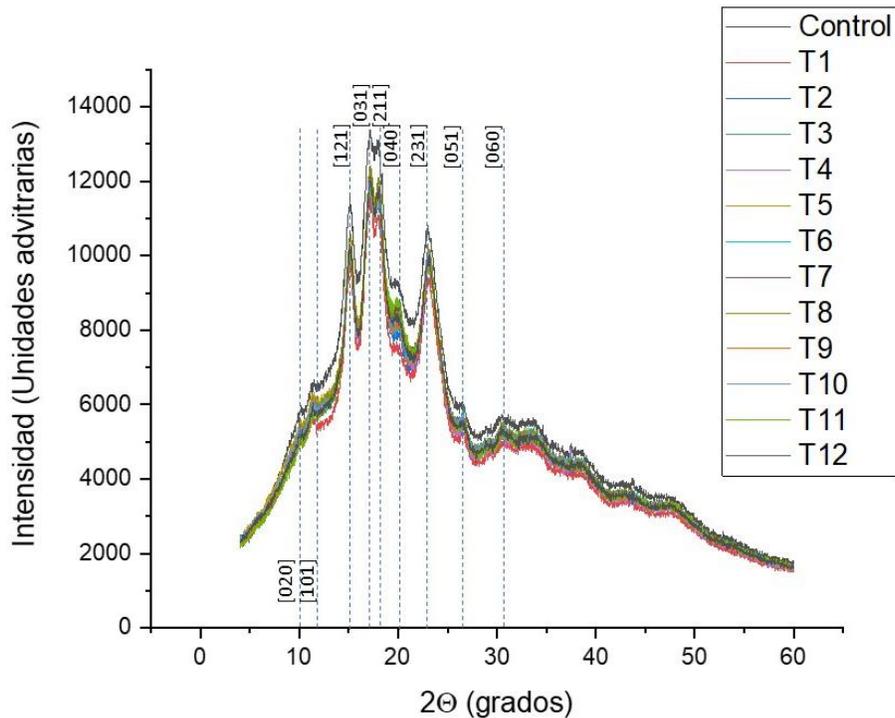
En general, los resultados obtenidos, para una misma fuente de almidón, presentaron una viscosidad aparente (VA) decreciente con el aumento de la intensidad del CEM al que fueron sometidas las plantas madre. Sin embargo, las muestras analizadas presentaron un perfil esperado, típico para los almidones en las condiciones de estudio (figura 26). Este comportamiento podría haber estado influenciado por características intrínsecas del almidón, como el tamaño y la morfología de sus gránulos, así como la relación amilosa/amilopectina y sus respectivas longitudes de cadena o la presencia de cristales (Hernández-Medina, et al., 2008). Por ello, en este punto, es importante destacar algunas de esas características intrínsecas del almidón aquí evaluado, tal y como se describe en la figura 26. La presencia del

resultado más bajo en el CEM extremo (118  $\mu$ T permanente durante 15 días) podría estar influida por el deterioro parcial de la estructura de los granos de almidón, aparentemente debido a una mayor actividad enzimática sobre los mismos.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que las moléculas de amilopectina suelen estar relacionadas con el pico de VA observado en el análisis de RVA (Liu, 2016), lo que podría explicar en parte por qué el almidón de maíz de control tiene un pico de VA más alto en comparación con el almidón de maíz de los tratamientos. Sin embargo, no se puede descuidar la relación de composición amilosa/amilopectina, ya que es un parámetro complejo e importante y puede influir en el comportamiento de gelatinización del almidón más que el contenido de amilopectina por sí solo (Rincón-Londoño, et al., 2016).

#### **d) Caracterización estructural mediante análisis cristalográfico por difracción de rayos X**

La técnica de rayos X proporciona información sobre las estructuras cristalinas en una muestra y los cambios de esta debido a la transformación fisicoquímica, tal como la que pudiera ocasionar la exposición a un campo electromagnético. Para estudiar los posibles cambios en las estructuras cristalinas de los gránulos de almidón debido a dicha exposición a los CEM, tal como quedó evidenciado en el diseño experimental, la figura 27 muestra los patrones de rayos X de la muestra de control y las muestras obtenidas a 23, 70 y 118  $\mu$ T a los 4 tiempos de exposición (1, 3 y 5 horas más la exposición permanente durante 15 días). La línea de guiones corresponde a la identificación de la estructura la que presenta un patrón Tipo A, que es característico de los almidones provenientes de cereales, cuyo sistema estructural corresponde a un sistema ortorrómbico, lo que coincide plenamente con la indexación propuesta por Rodríguez-García, et al. (2021). Estos patrones muestran la misma estructura ortorrómbica para todas las muestras estudiadas, indicando que el campo electromagnético no produce ningún efecto sobre la fase cristalina presente en este almidón. A partir de la figura 27 se puede señalar que los picos de dispersión se asocian con la disposición periódica de regiones alternas cristalinas y amorfas dentro del gránulo de almidón de maíz. La estructura ortorrómbica encontrada en los granos de maíz obtenidos no se ve afectada por la intensidad del campo electromagnético utilizado en este trabajo. Estos cristales de glucosa se utilizan como el mayor depósito o reserva de energía para mantener vivo el embrión.



**Figura 27.** Patrón de rayos X de almidones aislados para el control y los tratamientos.

Fuente: Propia.

Es de destacar que la estructura ortorrómbica se caracteriza por tener vectores básicos mutuamente perpendiculares, pero de distinta longitud adicional (Meléndez, 2021), lo que está relacionado al hecho de que no hayan modificaciones para el almidón analizado, esto unido a que no hay presencia de alteración de grupos funcionales en ningún tratamiento como se muestra en la figura 27. A su vez es importante mencionar que el patrón tipo A, se caracteriza por la presencia de picos de mayor intensidad de difracción para los ángulos  $2\theta = 15, 17, 18$  y  $23$ .

Unido a lo anterior, partiendo de las características que presentan los componentes del almidón (amilosa y amilopectina), se evidencia que el difractograma actúa de dos diferentes maneras (dos regiones), esto debido a las proporciones de cada uno de los componentes nombrados anteriormente.

- Región 1: mayor proporción de amilosa se manifiesta en una forma amorfa.

- Región 2: mayor proporción de amilopectina adopta una forma cristalina.

En la figura 27, se puede evidenciar que todos los tratamientos presentan picos característicos en los mismos puntos, esto soportado igualmente en que no hay modificaciones en los tratamientos influenciados con diferentes CEM en comparación con el control. Así mismo, la figura 27 permite la identificación de los ángulos  $2\theta$  de los picos más significativos, en el área cristalina, la cual está de  $0 - 30.5^\circ$ , correspondiente a la presencia de amilopectina del almidón, por lo que no se observa un cambio significativo en la ubicación de dichos picos en los patrones de rayos X comparando el control con los tratamientos, lo permite aseverar que al inducir las semillas de *Zea mays* L. var Porva con los CEM a las diferentes intensidades y tiempos de exposición declaradas en este documento, no se induce cambio en la morfología cristalina característica del almidón.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

Luego de aplicada la metodología planteada se pudo concluir que:

- Al realizar el análisis del efecto de los campos electromagnéticos inducidos con diferentes intensidades y tiempos de exposición sobre el proceso de germinación de semillas de *Zea mays* L. var Porva se pudo constatar que se presentó una respuesta positiva por parte de estas frente a la estimulación con CEM, ello dado por el logro de un máximo % de germinación obtenido en los tratamientos T7 y T8. Estos mostraron los más altos valores con 96 %, contrario a lo ocurrido con el Control, donde la máxima germinación solo llegó al 87 %. Los resultados indicaron que el proceso de germinación se vio estimulado por la aplicación de los campos electromagnéticos a intensidad media (70  $\mu$ T) dentro de las seleccionadas para esta investigación, pero a sus más altos tiempos de exposición (300' y permanente durante 15 días). Un incremento en el porcentaje de germinación del 9% representaría para el productor un ahorro significativo en materia de compra de semillas o en su defecto, por tener mayor número de semillas germinadas por unidad de superficie, traduciendo esto en mayores rendimientos al final del ciclo productivo.
- En materia de síntesis de pigmentos fotosintéticos (clorofilas A, B y totales) analizados en dos momentos en las plantas de *Zea mays* L. var Porva sometidas a campos electromagnéticos inducidos y comparando dichos resultados con las plantas control, mostrando una estimulación significativa evidenciada a través del contenido de estos. Es de resaltar que al existir una mayor concentración de pigmentos fotosintéticos por unidad de superficie de las hojas puede ser traducido como una mayor capacidad fotosintética de las plantas (entre otros indicadores), ya que representa una medida de las dimensiones del sistema fotosintético y de su eficiencia, determinando unísonamente la producción de biomasa en la planta bajo las diferentes condiciones experimentales.
- Los resultados evidencian una mayor velocidad de crecimiento con la estimulación con CEM, tanto del sistema radicular como la parte aérea de las plantas tratadas con campos electromagnéticos, guardando una estrecha relación con el desarrollo del

aparato fotosintético, la consiguiente producción de biomasa y su destinación (acumulación, mantenimiento o uso en la formación de nuevas estructuras) para el T8 (70  $\mu$ T con exposición permanente durante 15 días). Así mismo, desde otra perspectiva, los efectos directamente manifiestos sobre indicadores relacionados al desarrollo de las plantas objeto de estudio (lo que ocurre internamente con la biomasa producida) frente a la inducción con campos electromagnéticos de baja intensidad, mostraron una mayor eficiencia en las plantas tratadas respecto al control, siendo para la mayoría de indicadores de desarrollo las plantas bajo el tratamiento T12 (118  $\mu$ T con exposición permanente durante 15 días), lo que evidencia mayor eficiencia del uso de la biomasa comparado con el T8, el resto de tratamientos y el control. El análisis de este tipo de indicadores permite relacionar la ecofisiología y la agronomía para mejorar las actividades de manejo en los cultivos.

- El análisis de caracterización de las mazorcas de *Zea mays* L. var Porva y rendimiento del cultivo mostraron de forma general una mejor estructura de estas para las provenientes de plantas tratadas con CEM en materia de características de la mazorca. Respecto al rendimiento obtenido, para el control se obtuvo un rendimiento característico para el maíz amarillo en Colombia según datos oficiales para el año 2021, siendo de 2.46 t ha<sup>-1</sup> (la media nacional bajo sistema de producción tradicional es de 2.11 t ha<sup>-1</sup>, y para sistema tecnificado es de 5.52 t ha<sup>-1</sup>). Este indicador (rendimiento) se vio potenciado significativamente con el empleo de los CEM, obteniendo valores para el sistema de producción empleado en el estudio (laboreo mínimo con uso de elementos de los dos sistemas antes declarados) que difieren significativamente del control. El rendimiento más alto se presentó para el tratamiento T12 (118  $\mu$ T con exposición permanente durante 15 días) con una producción de 17.64 t ha<sup>-1</sup>, difiriendo significativamente de todos los tratamientos y control, así mismo superando con ello al rendimiento más alto de maíz (maíz amarillo tecnificado) en Colombia para el año 2021, donde se reporta en Valle del Cauca 8.29 t ha<sup>-1</sup>. Con el incremento de la intensidad del CEM se evidenció un incremento significativo de los rendimientos (118  $\mu$ T > 70  $\mu$ T > 23  $\mu$ T > C), el que no es tan marcado dentro de cada intensidad (diferentes tiempos de exposición), excepto a 118  $\mu$ T.

- Se demostró que el almidón no presentó cambios significativos en la morfología de los granos (evidenciado en las imágenes de MEB), ni en su estructura cristalina (ortorrómbica) debido a la aplicación de un campo electromagnético en las semillas madre. En este orden de ideas, se puede afirmar que los estudios de rayos X de almidones aislados de granos de maíz tratados con un campo electromagnético demostraron que la estructura cristalina ortorrómbica presente en los gránulos de almidón no se ve afectada.
- Mediante la técnica FTIR se verificó la presencia de bandas de señales características que pueden atribuirse al estiramiento de los enlaces C=O en el número de onda  $1.711\text{ cm}^{-1}$ , similar a las presentadas para el control. Así mismo, a  $2900\text{ cm}^{-1}$  se presentaron vibraciones de los enlaces C-H de los grupos metilos asociados con el anillo de glucopiranososa y señales a los  $1159$ ,  $1082$  y  $1014\text{ cm}^{-1}$ , que son atribuidas a los estiramientos de los enlaces C-O, así mismo, se presentan otras señales de absorción características a  $992$ ,  $929$ ,  $861$ ,  $765$  y  $575\text{ cm}^{-1}$  debido a las vibraciones de estiramiento del anillo de anhidroglucosa. Por su parte, la VA se comportó según el perfil esperado con el pico de VA por muestra ordenado (indistinto de intensidad y tiempo de exposición) como Control >  $23\ \mu\text{T}$  >  $70\ \mu\text{T}$  >  $118\ \mu\text{T}$ , disminuyendo con la intensidad del campo inducido, pero aparentemente sin afectar a las propiedades funcionales del mismo.

Por otra parte, se recomienda:

- Aún quedan algunos aspectos en el área de los CEM que podrían ser objeto de estudio, principalmente enfocados a su accionar sobre la dinámica fisiológica de la planta.
- Que se tenga en cuenta en futuros estudios de almidón el análisis de distribución de partículas, permitiendo así poder estimar el efecto sobre el tamaño de los granos de almidón y su asociación con las propiedades funcionales de estos.
- Realizar estudios del comportamiento genético y enzimático durante el ciclo del cultivo, en poscosecha y al interior de los frutos, así como su relación con la degradación de la superficie de los granos de almidón. Esto podría generar resultados tendientes a

interpretar la vida útil del fruto y del almidón de maíz, así mismo la generación de valor agregado.

- Realizar el estudio en otras variedades de maíz, específicamente variedades de maíz criollo, lo que facilitaría el proceso de transferencia tecnológica a los pequeños y medianos productores, los que en Colombia ocupan más del 80% de fincas productoras y así tributar a la soberanía alimentaria.

## 7. Referencias

- Agama, E., Juárez, E., Evangelista, S. Rosales-Reynoso, O. L., Bello-Pérez, L. A. (2013). Características del almidón de maíz y relación con las enzimas de su biosíntesis. *Agrociencia*, 1 -12. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-31952013000100001](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952013000100001)
- Agama-Acedevó, E., Salina-Moreno, Y., Pacheco-Vargas, G., Bello-Pérez, L. A. (2011). Características físicas y químicas de dos razas de maíz azul: morfología del almidón. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 317 - 329. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4182299>
- Agüero, C. G., Pereyra, G. R., Rolando, R. O. (2017). Método alternativo de germinación para determinar la calidad de semillas en Buffel Grass (*Cenchrus ciliaris* L.). *Agriscientia*, 34, 47-58. Recuperado el 31 de 07 de 2019, de <https://pdfs.semanticscholar.org/8461/02b0bbcc50ce2f7e89fe99a5c07055a6696c.pdf>
- Aladjadiyan, A. (2010). Influence of stationary magnetic field on lentil seeds. *Int. Agrophysics*. 24, 321- 324. <http://www.international-agrophysics.org/Influence-of-stationary-magnetic-field-on-lentil-seeds,106388,0,2.html>
- Aladjadiyan, A. (2012). Physical factors for plant growth stimulation improve food quality, food production-approaches, challenges and tasks. (Ed. Anna Aladjadiyan), ISBN: 978-953-307-887-8. In Tech Publisher, 145-68, Rijeka, Croatia. DOI:10.5772/32039
- Alonso-Fustel, E., García-Vázquez, R., Onaindia-Olalde, C. (2011). Campos electromagnéticos y efectos en salud. Biskaia. 70 págs. [https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/salud\\_amb\\_campos\\_electrom/es\\_def/adjuntos/CEM\\_cast.pdf](https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/salud_amb_campos_electrom/es_def/adjuntos/CEM_cast.pdf)
- Anaya, M., Barbará, E., Padrón, J., Borrego, S., Valdés, O., Molina, A. (2015). Influencia del campo magnético sobre el crecimiento de microorganismos patógenos ambientales aislados en el Archivo Nacional de la República de Cuba. *Biomédica*, 35 (3): 325-236. doi: <http://dx.doi.org/10.7705/biomedica.v35i3.2569>

- Antonietta, M. (2012). Impacto de la senescencia foliar sobre la producción de fotoasimilados y el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) bajo condiciones de estrés abiótico. Tesis doctoral. U.N.L.P. 214 págs.
- AOAC. (1990). Métodos oficiales de análisis de la AOAC, 15ª ed. Métodos 932.06, 925.09, 985.29, 923.03. Asociación de químicos analíticos oficiales. Arlington, Virginia, Estados Unidos.
- Arias-Franco, S., Sabogal-Tobar, D., Perez-Gosteva, T., Reyes-Ramírez, S. (2021). Influencia del campo magnético en el suelo y en los cultivos de Rábano (*Raphanus sativus*). UGCiencia. 27, 10-16. <https://doi.org/10.18634/ugcj.27v.1i.1128>
- Badui-Dergal, S. (2006). Química de los alimentos. Ciudad de México: Pearson educación de México.
- Barone, J., Duarte, E., Luna, C. (2016). Determinación de la eficacia de métodos de evaluación de calidad de semillas de especies forestales nativas de la Selva Atlántica Quebracho. Revista de Ciencias Forestales, 24(2), 70- 80. <https://www.redalyc.org/journal/481/48163565003/html/>
- Barrientos-Llanos, H., del Castillo C. R., García M. (2015). Functional analysis of growth, biomass accumulation and translocation of dry matter eight vegetables grown in greenhouses, Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales, 2(1), 7-118.
- Carbonell, M. V., Flórez, M., Martínez, E., Álvarez, J. (2017). Aportaciones sobre el campo magnético: historia e influencia en sistemas biológicos. Rev. Intropica. 12(2), 143 – 159. <http://dx.doi.org/%2010.21676/23897864.2282>.
- Cervantes-Ramírez, J. E., Cabrera-Ramírez, A., Morales-Sánchez, E., Rodríguez-García, M. E., Reyes-Vega, M., Ramírez-Jiménez, A., Gaytán-Martínez, M. (2020). Amylose-lipid complex formation from extruded maize starch mixed with fatty acids. Carbohydrate Polymers. doi:<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116555>
- Cornejo-Villegas, M. d., Rincón-Londoño, N., López, A. D., Rodríguez-García, M. E. (2017). The effect of Ca<sup>2+</sup> ions on the pasting, morphological, structural, vibrational, and mechanical properties of corn starch–water system. Journal of Cereal Science. doi:DOI: 10.1016/j.jcs.2017.10.003

- Coronel, R. A. (2015). Efecto de la amonificación de la paja de maíz, sobre su valor nutricional. Torreón, Coahuila. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/6925>
- Cruz, O. (2013). Manual para el cultivo del maíz en honduras. Tegucigalpa.
- Dessie, G., Habtie, B. (2017). Growth and Yielding Potential of Hot Pepper Varieties Under Rain-Fed Production at Woreta, Northwestern Ethiopia. International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences, 3(3), 11-18. doi: <http://dx.doi.org/10.20431/2454-6224.0303002>
- Dow, G. J., Bergmann, D. C. (2014). Patterning and processes: how stomatal development defines physiological potential. Current Opinion Plant Biol. 21, 67-74.
- Elizalde, V., García, J., Peña, C., Barra, M., Leyva, O., Trejo, C. (2017). Viabilidad y germinación de semillas de *Hechtiaperotensis* (*Bromeliaceae*). Revista de Biología Tropical 65 (1), 153-165.
- Esitken, A., Turan, M. (2014). Alternating Magnetic Field Effects on Yield and Plant Nutrient Element Composition of Strawberry (*Fragaria x ananassa* cv. Camarosa). Soil & Plant Science. 135 - 139.
- Esquivel-Fajardo, E. A., Martínez-Ascencio, E. U., Oseguera-Toledo, M. E., Londoño-Restrepo, S. M., Rodríguez-García, M. E. (2022). Influence of physicochemical changes of the avocado starch throughout its pasting profile: Combined extraction, Carbohydrate Polymers, 281, 119048, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.119048>.
- FENALCE (2022). Federación Nacional de Cultivadores de Cereales, Leguminosas y Soya. Obtenido de <https://fenalce.co/estadisticas/>
- Fischer, G., Tausz, M., Kock, M., Grill, D. (2004). Effects of weak 16 2/3 Hz gagneticfields on growth parameters of young sunflower. *Bioelectrochemistry*. 641. 638–641.
- Flores, F., Lozano, F. Y., Ramos, A., Salgado, R., Guerrero, V. M., Ramírez, S., Bello, L. A. Zamudio, P. B. (2014). Caracterización fisicoquímica, reológica y funcional de harina de avena (*Avena sativa* L. cv Bachíniva) cultivada en la región de Cuauhtémoc. Octava edición. Chihuahua. Tecnociencias. 152-162.
- Flórez, M., Martínez, E., Carbonell, M. V. (2012). Effect of Magnetic Field Treatment on Germination of Medicinal Plants *Salvia officinalis* L. and *Calendula officinalis* L. Pol. J. Environ. Stud. 57 - 63.
- Galland, P., Pazur, A. (2005). Magnetoreception in plants. J. Plant Res. 118(6), 371–389.

- Guacho-Abarca, E. F. (2014). Caracterización agro-morfología del maíz (*Zea mays* L.) de la localidad de San José de Chazo. Riobamba: Escuela Superior Politécnica.
- Guerra-Del Valle, D., Bello-Pérez, L., González-Soto, R. (2008). Efecto del tiempo de reacción en la acetilación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 7(3), 283-291. <https://www.redalyc.org/pdf/620/62011164012.pdf>
- Hay, R., Porter, J. (2006). *The Physiology of Crop Yield*. 2nd Edition, Blackwell Publishing, Oxford.
- Hernández - Medina, M., Torruco - Uco, J. G., Chel - Guerrero, L., Betancur, A. D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 718-726. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000300031>
- Hidalgo, O. X., Micho, Y. N. (2016). Modificación química de almidón nativo de maca (*Lepidium peruvianum*) en sus características fisicoquímicas y reológicas. Tarma - Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4767>
- Hincapie, E. A., Torres Osorio, J., Bueno López, L. (2010). Effect of the magnetic field on the germination of *Leucaena leucocephala*. *Scientia et Technica*. 44, 337-341. <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/download/1861/1107>
- Holubowicz, R., Kubisz, L., Gauza, M., Tong, Y. (2014). Effect of Low Frequency Magnetic Field (LFMF) on the Germination of Seeds and Selected Useful Characters of Onion (*Allium cepa* L.). *Not Bot Horti Agrobo*. 168 - 172.
- Hoyos, L. J. (2015). Efecto del tratamiento hidrotérmico del almidón de plátano: digestibilidad y características fisicoquímicas. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro. <http://ring.uaq.mx/handle/123456789/975>
- Hussaina, I., Roberto, S., Batista, I., Marinho, A., Koyama, R., Correa, L. (2016). Phenology of 'Tupy' and 'Xavante' blackberries grown in a subtropical area, *Sci. Horti*. 201, 78-83. Doi: 10.1016/j.scienta.2016.01.036
- IGAC (2019). Levantamiento Detallado de Suelos en las Áreas Planas de 14 municipios de la Sabana de Bogotá. [https://www.academia.edu/26538056/Levantamiento\\_Detallado\\_de\\_Suelos\\_en\\_las\\_%C3%81reas\\_Planas\\_de\\_14\\_municipios\\_de\\_la\\_Sabana\\_de\\_Bogot%C3%A1](https://www.academia.edu/26538056/Levantamiento_Detallado_de_Suelos_en_las_%C3%81reas_Planas_de_14_municipios_de_la_Sabana_de_Bogot%C3%A1)

- Imukova, K., Ingwersen, J., Hevart, M., Streck, T. (2016). Cierre del balance de energía en un rodal de trigo de invierno: comparación de la técnica de covarianza de remolinos con el método de balance de agua del suelo. *Biogeociencias* 13: 63-75.
- Iqbal, M., Ahmad, I., Hussain, S. M., Kheral, R. A., Bokhari, T. H., Shehzad, M. A. (2013). Optimization of pre-sowing magnetic field doses through RSM in pea. *Int. Agrophys.* 27(3), 265-274.
- Joya, R. N. (2015). El Magnetismo en la Agricultura. *Revista de Electricidad y Magnetismo.* 1000017 –9, 1 - 3. <https://studylib.es/doc/657107/el-magnetismo-en-la-agricultura>
- Liu, J., Shim, Y. Y., Poth, A. G., Reaney, M. J. T. (2016). Conlinin in flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) gum and its contribution to emulsification properties. *Food Hydrocolloids* 52, 963-971. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.09.001>.
- Maffei, M. E. (2014). Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution. *Front. Plant Sci.* 5, 1–15.
- Mahajan, T. S., Pandey, O. P. (2011). Reformulation of Malthus-Verhulst equation for black gram seeds pretreated with magnetic field. *Int. Agrophysics.* 25, 355-359.
- Mahajan, T. S., Pandey, O. P. (2014). Magnetic-time model at off-season germination. *Int. Agrophysics.* 28, 57-62.
- Mansilla, P. S. (2018). Evaluación del valor nutricional de maíces especiales (*Zea mays* L.): selección para la calidad agroalimentaria. Córdoba.
- Meléndez, M. J. (2021). Estructura de los sólidos cristalografía, difracción y defectos. Cáceres: Universidad de Extremadura. Servicio de Publicaciones. <https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/12423/1/978-84-09-30850-7.pdf>
- Méndez-Carrejo, M. (2013). Aplicación de campos electromagnéticos en semillas de ají (*Capsicum frutescens* L.). Calí: Universidad del Valle.
- Meneses, J., Corrales, C., Valencia, M. (2007). Síntesis y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. *Revista EIA.* 8. 57 - 67. <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n8/n8a06.pdf>
- Molina-Cardín, A. (2019). Análisis de las fluctuaciones del campo geomagnético principal. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/57841/1/T41459.pdf>

- Moreno-Medina, B. L., Casierra-Posada, F., Blanke, M. (2016). Growth rates in blackberry (*Rubus alpinus* Macfad) plants under different pruning systems. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1), 28-39, Doi: <http://dx.doi.org/10.17584/rcch.2016v10i1.4457>
- Moussa, H. (2011). The Impact of Magnetic Water Application for Improving Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Production. *New York Science Journal*. 15 - 20.
- Noguera-Varón, I. (2020). Caracterización del consumo de maíz, y prácticas culinarias en familias molineras de los municipios de Socha y Socotá en el departamento de Boyacá. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Ortega-Martínez, L. D., Sánchez-Olarte, J., Díaz-Ruiz, R., Ocampo-Mendoza, J. (2010). Efecto de diferentes sustratos en el crecimiento de plántulas de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill). *Ra Ximhai*, 6(3), 365-372. <http://www.redalyc.org/pdf/461/46116015005.pdf>
- Ortigoza, J., López, C., González, J. D. (2019). Guía Técnica cultivo de maíz. San lorenzo.
- Ortiz-Aguilar, J., Suárez-Rivero, D., Puentes, A. E., Velásquez Perilla, P. E. y Santis Navarro, A. M. (2015). Comparison of the Effects in the Germination and Growth of Corn Seeds (*Zea mays* L.) by Exposure to Magnetic, Electrical and Electromagnetic Fields. *Chemical Engineering Transactions*. 43, 169-174. doi:10.3303/CET1543029
- Pavón, A. (2020). Generalidades del maíz. Instalación de riego por goteo en una parcela de maíz. <https://www.gestiriego.com/riego-por-goteo-en-el-cultivo-del-maiz/>
- Pavón, J., Zapata, O. (2012). Comparación de tres fertilizantes orgánicos y un combinado en el cultivo de maíz (*Zea mays*), en el campus agropecuario de la UNAN-León en el periodo comprendido de abril a julio del 2011. <http://hdl.handle.net/123456789/5671>
- Petkovic, D., Radic, M. (2015). Generalization of Helmholtz coil problem. *Serbian J. Electr. Eng.* 12(3), 375–384.
- Pietruszewski, S., Kania, K. (2010). Effect of magnetic field on germination and yield of wheat. *Int. Agrophys.* 24(3), 297-302.
- Pietruszewski, S., Martínez, E. (2015). Magnetic field as a method of improving the quality of sowing material: a review. *Int. Agrophys.* 29(3), 377-389. <https://doi.org/10.1515/intag2015-0044>.
- Pineda-Gómez, P., Rosales-Rivera, A., Rodríguez-García, M. E. (2012). Effect of the thermo-alkaline treatment over the thermal degradation of corn starch. *Starch - Stärke*, 776 - 785. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201400025618>

- Ramírez-Martín C., Durán-Avenidaño O. (2015). Técnicas de medida para la capacitancia y resistencia eléctrica de una membrana de bicapa lipídica. *Revista I3+*, 3, 46-65.
- Rincón-Londoño, N., Millán-Malo, B., Rodríguez-García, M. E. (2016). Analysis of thermal pasting profile in corn starch rich in amylose and amylopectin: Physicochemical transformations, part II. *International Journal of Biological Macromolecules*. 89, 43-53, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.057>.
- Rivas-González, M., Guadalupe, M., Méndez-Montevalvo, C., Sánchez-Rivera, C., Núñez, S., Bello-Pérez, L. A. (2008). Caracterización morfológica, molecular y fisicoquímica de almidón de plátano oxidado y litnerizado. *Agrociencia*. 487-497. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v42n5/v42n5a1.pdf>
- Rivera, A. E. (2017). Extracción y caracterización parcial de almidón de una fuente no convencional: raíz de calabacilla loca (*Cucurbita foetidissima* HBK). Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Rivera, J. D. (2016). Análisis de la influencia de la estimulación magnética en el comportamiento de la concentración del ácido giberélico en semillas de maíz (*Zea mays*). Universidad de Caldas.
- Rodi, P. M. (2020). Propiedades biofísicas de membranas celulares y sistemas modelo. Rol de los esteroides en la determinación de las propiedades estructurales, dinámicas y funcionales de la membrana plasmática en células de insecto. *Proyectos de Investigación CAI+D*. Universidad Nacional del Litoral. <https://hdl.handle.net/11185/6016>
- Rodríguez-García, M. E., Hernández-Landaverde, M. A., Delgado, J. M., Ramírez-Gutiérrez, C. F., Ramírez-Cardona, M., Millán-Malo, B. M., Londoño-Restrepo, S. M. (2021). Crystalline structures of the main components of starch. *Current Opinion in Food Science*. 37, 107-111, <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.002>.
- Rodríguez-García, M. E., Hernández-Landaverde, M. A., Miguel, D. J., Ramírez-Gutiérrez, C., Ramírez-Cardona, M., Millán-Malo, B., & Londoño-Restrepo, S. (2020). Crystalline Structures of the main components of Starch. *Current Opinion in Food Science*, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.10.002>
- Romero, F., García, Y. (2016). Evaluación de 5 líneas de Maíz (*Zea mays*, L.) en las condiciones edafoclimáticas de la. *Medio Ambiente "Ojeando la agenda"*, 1 - 14.

- Rosales, A. (2019). Acumulación de nutrientes en el desarrollo de la mazorca. Biofortificación de cultivos y adaptación climática para la seguridad alimentaria y nutricional. 1 - 24. Honduras.
- Salinas, Y., Cruz, F. (2012). Granos de maíces pigmentados de Chiapas, características físicas, contenido de antocianinas y valor nutracéutico. *Fitotecnia Mexicana*. 33 - 41.
- Sánchez-Ortega, I. (2014). Maíz I (*Zea mays*). *Reduca (Biología)*. Serie Botánica. 151-171. ISSN: 1989-3620
- Sánchez-Soto, B. H., Pacheco-Aispuro, E., Lugo-García, G. A., Reyes-Olivas, Á., García-Moya, E. (2017). Métodos de escarificación en semillas de *Guaiaecum coulteri*, especie amenazada del bosque tropical caducifolio del norte de Sinaloa, México. *Gayana Botanical*, 74(2), <https://scielo.conicyt.cl/pdf/gbot/v74n2/0717-6643-gbot-74-02-00262.pdf>
- Sedano, C. G.; González, H. V. A.; Engleman, E. M., Villanueva, V. C. (2005). Dinámica del crecimiento y eficiencia fisiológica de la planta de Calabacita. México. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 11:291-297.
- Serratos-Hernández, J. A. (2012). El origen y la diversidad del maíz en el continente americano 2a edición. Ciudad de México: Aleira Lara.
- Sigala, B. (2019). Obtención de almidones de papa (*Solanum tuberosum*) pregelatinizados usando calentamiento óhmico. Santiago de Querétaro. <http://ring.uaq.mx/handle/123456789/1497>
- SIOVM. (2022). Sistema de Información de los Organismos Vivos Modificados. [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/cgi-bin/siovm\\_pdf.cgi](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/cgi-bin/siovm_pdf.cgi)
- Stange, B. C., Rowland, R. E., Rapley, B. I., Podd, J. V. (2002). ELF Magnetic Fields Increase Amino Acid Uptake into *Vicia faba* L. Roots and Alter Ion Movement Across the Plasma Membrane, *Bioelectromagnetics*. 23(5), 347– 354.
- Suárez-Rivero, D., Marin-Mahecha, O., González, A. J., Suarez-Rivero, M., Puentes, A. E., Ortiz-Aguilar, J. (2018). Composition and behavior of sunflower seeds (*Helianthus annuus* L.) from plants treated with magnetic fields for energy potential use of biomass. *Chemical Engineering Transactions*. 65, 679-684. DOI: 10.3303/CET1865114.
- Suárez-Rivero, D., Marín-Mahecha, O., Salazar Torres, V., Real, X., Ortiz Aguilar, J., Suárez-Rivero, M. (2017). Biomass Production And Morpho-Physiological Effects On Sunflower Plants (*Helianthus annuus* L.) Under Induced Magnetic Fields. *Chemical Engineering Transactions*. 57, 115-120. doi:10.3303/CET1757020

- Suárez-Rivero, D., Ortiz-Aguilar, J., Marín-Mahecha, O., Velásquez, P., Acevedo, P., Santis, A. (2016). The Effect of Magnetic and Electromagnetic Fields on the Morpho-Anatomical Characteristics of Corn (*Zea mays* L.) during Biomass Production. *Chemical Engineering Transactions*. 50, 415-420. DOI: 10.3303/CET1650070.
- Tadeu, M., Souza, F., de Pio, R., Valle, M., do Locatelli, G., Guimarães, G., Silva, B. (2015). Drastic summer pruning and production of blackberry cultivars in subtropical areas, *Pesqui. Agropecu. Bras*, 50, 132-140. Doi: 10.1590/S0100-204X2015000200005
- Taiz, L., Zeiger, E. (2010). *Plant physiology*, 5a ed. Sinauer Associates, Sunderland, MA.
- Ticona-Quea, J. (2019). Caracterización fisicoquímica, cinética de gelificación y evaluación espectroscópica de la pectina del mesocarpio del fruto *Corryocactus brevistylus* (Sancayo). <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8296>
- Tollenaar, M., Deen, W., Echarte, L., Liu, W. (2006). Efecto del estrés por hacinamiento sobre la acumulación de materia seca y el índice de cosecha en maíz. *Agron. J.* 98, 930–937. doi: 10.2134/agronj2005.0336
- Torres, C., Díaz, J. E., Cabal, P. A. (2008). Efecto de campos magnéticos en la germinación de semillas de arroz (*Oryza sativa* L.) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Agronomía Colombiana*, 26(2), 177-185. <http://www.redalyc.org/pdf/1803/180314732002.pdf>
- Ursache, M., Mindru, G., Creanga, D., Tufescu, F., Goiceanu, C. (2009). The effects of high frequency electromagnetic waves on the vegetal organisms. *Romanian Journal of Physics*, 133 - 145.
- Vashisth, A., Nagarajan, S. (2010). Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus*) seeds exposed to static magnetic field. *Journal of Plant Physiology*. 167 (29), 149 - 156. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.08.011>.
- Vashisth, A., Ravender, S., Joshi, D. (2013). Effect of Static Magnetic Field on Germination and Seedling Attributes in Tomato (*Solanum lycopersicum*). *Journal of Agricultural Physics*, 182 -185.
- Villarroel, P., Gómez, C., Vera, C., Torres, J. (2018). Almidón resistente: Características tecnológicas e intereses fisiológicos. *Revista chilena de nutrición*. 44(3). 271 - 278. <http://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182018000400271>
- Walter G. Q., Alonso R. (2017). El campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz y su aplicación a la calibración de sondas. *Rev. Elektron*. 1(2), 91–96.

- Wilches-Rojas, F. A. (2008). Tamaños de alvéolo y diferentes láminas de riego en obtención de plántulas de tomate. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 11(2), 141-151. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-42262008000200015](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262008000200015)
- Yamashita, M., Tomita-Yokotani, K., Hashimoto, H., Takai, M. Tsushima, M., Nakamura, T. (2004). Experimental concept for examination of biological effects of magnetic field concealed by gravity. *Adv. Sp. Res.* 34, 1575–1578.
- Young, H., Freedman, R. (2009). *Física Universitaria con física moderna*. 12(2). Pearson Educación, México. 896 págs. [http://www.unet.edu.ve/gilbpar/images/LIBROS\\_FISICA/Sears\\_Zemansky\\_LIBRO-signed.pdf](http://www.unet.edu.ve/gilbpar/images/LIBROS_FISICA/Sears_Zemansky_LIBRO-signed.pdf)
- Zepeda, B. R., Hernández, A. C., Suazo, L. F., Domínguez, P. A., Cruz, O. A., Martínez, O. E., Hernández, S. L. M. (2011). Physical characteristics of maize grain and tortilla exposed to electromagnetic field. *Int. Agrophysics.* 25, 389-393.
- Zepeda-Bautista, R., Virgen-Vargas, J., Suazo-López, F., Domínguez-Pacheco, F. A., Rodríguez-Rebollar, H., Hernández-Aguilar, C. (2019). Campo electromagnético en plántulas, rendimiento y calidad de maíz en condiciones de campo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* 10(3), 629-642.
- Zibetti-Fornari, E., Gaviraghi, L., Basso, C. J., Marques-Pinheiro, C. V., Vian, A. L., Santi-Ezequiel, A. L. (2020). Relationship between photosynthetic pigments and corn production under nitrogen sources. *Pesq. Agropec. Trop., Goiânia*, 50, e63661, DOI: 10.1590/1983-40632020v5063661.
- Torres, J., Hincapie, E., Gilart, F. (2018). Characterization of magnetic flux density in passive sources used in magnetic stimulation. *J. Magn. Magn. Mater.* 449,366–371.
- Vashisth, A., Joshi, D. K. (2017). Growth characteristics of maize seeds exposed to magnetic field. *Bioelectromagnetics.* 38(2), 151–157.
- Saini, P. K., Pradesh, U. (2018). Plant Hormones: Their nature occurrence and functions: A chapter. *Eur. J. Biotechnol. Biosci.* 6(6), 13–17.

