

TRATAMIENTO MAGNÉTICO EN SEMILLAS DE TOMATE, SU INFLUENCIA EN LA GERMINACIÓN Y DESARROLLO TEMPRANO

MAGNETIC TREATMENT OF TOMATO SEEDS, ITS INFLUENCE ON GERMINATION AND EARLY DEVELOPMENT

Yadir Hidalgo-Peña,^{1*} <https://orcid.org/0009-0002-9072-1030>
Pedro A. Mariño-Castellanos,¹ <https://orcid.org/0000-0003-1199-0567>
Ernesto R. Córdova-Aguilera,¹ <https://orcid.org/0009-0007-3741-0213>
Eduardo Fernández-Santiesteban,¹ <https://orcid.org/0000-0002-8313-210X>

¹Facultad de Ciencias Naturales y Agropecuarias, Universidad de Holguín, Cuba

*Autor para correspondencia: yhidalgo89cu@gmail.com, yhidalgop@uho.edu.cu

Recibido: 4 de junio de 2025

Aprobado: 15 de septiembre de 2025

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo, validar un modelo fenomenológico realizado para predecir los valores de campos magnéticos (B) y tiempos de exposición (T_{expB}) óptimos; valores que definen la dosis de exposición magnética óptima para aplicar en semillas de cultivos de tomate, con el fin de aumentar la germinación y productividad de los mismos, teniendo como punto de partida, que la dosis de exposición magnética que se debe aplicar a las semillas está dada por la ecuación: $D_B = \frac{10^7}{8\pi} B^2 t_{expB}$. Para este cultivo, la dosis predicha por el modelo es de $481 \text{ KJm}^{-3} \text{ s}$. Las semillas fueron tratadas con un dispositivo de imanes permanentes a una densidad de campo magnético estacionario de 24 ± 2 militesla (mT), durante un tiempo de 35 min. Se demostró que el tratamiento magnético, en presiembra, tiene un efecto positivo importante sobre el número de semillas germinadas, en este cultivo.

Palabras clave: semillas; tomate; tratamiento magnético en presiembra.

ABSTRACT

This research aimed to validate a phenomenological model designed to predict optimal magnetic field values (B) and exposure times (T_{expB}). These values define the optimal magnetic exposure dose to be applied to tomato seeds in order to increase their germination and productivity, based on the assumption that the magnetic exposure dose to be applied to the seeds is given by the equation: $D_B = \frac{10^7}{8\pi} B^2 t_{expB}$. For this crop, the dose predicted by the model is $481 \text{ KJm}^{-3} \text{ s}$. The seeds were treated with a permanent magnet device at a stationary magnetic field density of 24 ± 2 millitesla (mT) for 35 min. It was demonstrated that magnetic treatment before sowing has a significant positive effect on the number of germinated seeds in this crop.

Keywords: seeds; tomato; presowing magnetic treatment.

INTRODUCCIÓN

Los métodos más utilizados para lograr el aumento de los rendimientos agrícolas abarcan desde, la aplicación de técnicas de manejo integrado de plagas y enfermedades, el uso de fertilizantes y nutrientes balanceados, hasta el desarrollo de variedades de cultivos mejoradas genéticamente.⁽¹⁾

La implementación de sistemas de riego más eficientes, la adopción de prácticas de conservación del suelo y el uso de tecnologías de precisión, como la agricultura de precisión y la tele detección, también han cobrado relevancia en la búsqueda de soluciones innovadoras para maximizar la producción de alimentos.⁽¹⁾

Son muchos los tratamientos aplicados a semillas con el fin de aumentar el índice germinativo, entre ellos, el tratamiento magnético (TM) como una técnica emergente con potencial para mejorar la germinación y el rendimiento de cultivos, específicamente al aplicar esta técnica a semillas antes de la siembra, ha alcanzado gran auge en la actualidad. El papel de los campos magnéticos estáticos se analiza en relación con el aumento de la germinación de semillas, incrementos en el crecimiento de raíces y tallos, aumentos significativos en los rendimientos, así como en proteínas y el contenido de clorofila.^(2,3,4,5)

En el caso de la estimulación de semillas en la presembrado, la dosis de exposición magnética, es decir, el producto de la densidad de flujo magnético aplicado (B) y del tiempo de exposición (T_{expB}), es el parámetro que permite valorar tanto el aumento de los parámetros mencionados arriba como la productividad de los cultivos.⁽⁶⁾ Además, es el parámetro que permite una correcta comparación entre la dosis de exposición magnética, debido al campo magnético terrestre y las dosis de campos magnético aplicados de forma artificial.

Los tomates se encuentran entre los cultivos más estudiados en cuanto a los efectos de los campos magnéticos estáticos sobre la germinación de las semillas, el crecimiento de las plántulas y la productividad.^(7,8,9,10,11,12,13)

La dosis de exposición magnética, promedio a las que están sometidas las semillas de tomate, desde la siembra hasta la emergencia, debido al campo magnético de la tierra es de $902,4 \times 10^{-3} \text{ KJm}^{-3}\text{s}$ ($B_{Tierra} \sim 0,05 \text{ mT}$ y $t_{exp} \sim 15120 \text{ min}$), normalmente llamada en todos los estudios “control”.

Investigaciones en semillas de tomate⁽²⁾ usando imanes permanentes con densidad de inducción

magnética de 5 y 10 mT, durante tiempos de 1, 10, 20, 60, 1440 y 2880 min (valores de dosis de exposición magnética que van desde 0,597 hasta $6,88 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$); siendo demostrado que los por cientos de germinación, en algunos de los casos tratados, estuvieron en la categoría obtenida en la intervención no tratada. El resultado más favorable se logró para tiempo de exposición de 10 min para ambos campos (dosis de exposición magnética de 5,971 y $23,87 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$, respectivamente).

Efectos análogos, en los porcentajes de germinación, fueron descritos al tratar semillas de tomate con densidades de campos magnéticos (CM) de 100, 150 y 200 mT durante periodos de 1, 5, 10 y 15 min, siendo el tratamiento más efectivo el de 15 min con CM de 100 mT ($3,58 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$).⁽⁸⁾

Otras investigaciones con el tomate, reportan aumentos de los porcentajes de germinación al exponer semillas a CM, tanto estacionarios (CME), como variables (CMV).^(9,10,11)

Otros autores⁽¹²⁾ reportaron disminución del tiempo medio de germinación (TMG) en las semillas de tomate, cuando fueron expuestas a CM de 15 y 25 mT durante 5, 15 y 25 min (cantidades de muestra a partir $26,9 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$ hasta $373,2 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$). Otras investigaciones describen aumento de los rendimientos productivos de las plantas provenientes de semillas TM, en comparación con las del control no tratado,⁽¹³⁾ al exponer semillas a un CM de 12,5 mT durante 5, 10 y 15 min, reportan un aumento del rendimiento en todos los tratamientos donde las semillas fueron expuestas, siendo más significativo para el tiempo de 15 min ($56 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$) con un aumento del 80,93 % en comparación con el control.

Estos resultados demuestran, que el TM en semillas es un método físico que se puede utilizar para lograr estimular la germinación y el desarrollo de las plantas, así como los rendimientos productivos. A pesar de esto, se observa que existen divergencias en los valores de densidad de flujo magnético y tiempos de exposición, debido a que no existe una metodología estandarizada de TM, que regule los valores óptimos de la dosis de exposición propuesta por Pietruszewski y Martínez.⁽⁶⁾

De todo lo anterior se observan dos regularidades básicas, en el caso del cultivo del tomate. En general, los resultados obtenidos con CME son siempre mejores respecto al control; en segundo lugar, los mejores resultados se obtienen para dosis de exposición magnética, generalmente, mucho mayores que las debidas al campo magnético terrestre.

Para superar esta restricción en la aplicación de técnicas magnéticas a los cultivos, se propone un modelo fenomenológico. Este modelo pronostica la densidad de flujo magnético y los tiempos de exposición óptimos, estableciendo así, una metodología estandarizada para la intervención magnética en diversos cultivos. La dosis de exposición magnética previa a la siembra es una variable clave en esta metodología.

El objetivo de esta investigación es, validar los valores de densidad de flujo magnético (B) y tiempos de exposición (T_{expB}) óptimos, predichos por un modelo fenomenológico en semillas de tomate. De este modo, se establecen comparaciones entre los valores arrojados por el modelo propuesto por los autores, el ajuste de las dependencias experimentales, de acuerdo con las expresiones propuestas por Pietruszewski y Martínez,⁽⁶⁾ y los valores utilizados en la bibliografía publicada para este cultivo.

Fundamentación teórica

Algunas de las ecuaciones del modelo

La concepción del modelo se basa en que la variable fundamental a tener en cuenta es la dosis de exposición magnética, determinada por la ecuación (1).⁽⁶⁾

$$D_B = \frac{10^7}{8\pi} B^2 t_{expB} \quad (1)$$

Las ecuaciones (2) y (3) relacionadas con el modelo, predicen la densidad de campo magnético y el tiempo de exposición teóricos por cultivo:

$$B_{imanteo} = B_{tierra} \sqrt{\left(\frac{4\pi}{3}\right) \frac{F_{gerBiman}}{(F_{comp}/F_{amb})V_{conf}}} \quad (2)$$

$$t_{expB} = \frac{D_{tierra} \sqrt{\left(\frac{4\pi}{3}\right) \frac{F_{gerBiman}}{(F_{comp}/F_{amb})V_{conf}}}}{B_{imanteo}^2} \quad (3)$$

donde:

$B_{imanteo}$: densidad del flujo magnético a aplicar por cultivo.

B_{tierra} : densidad del flujo magnético debido al campo magnético de la tierra.

$F_{gerBiman}$: fracción de germinación de las semillas expuestas al CM externo.

F_{comp} : factor aportado por la magnetización de cada elemento, calculado teniendo en cuenta los minerales o compuestos ferromagnéticos que poseen las semillas en estudio.

F_{amb} : factor aportado por la magnetización de la semilla en función de cada parámetro ambiental, calculado teniendo en cuenta los parámetros que más influyen en la germinación de las semillas (humedad, temperatura y luminosidad) y otros como el pH del suelo y la presión atmosférica.

V_{conf} : volumen de la configuración para el TM de semillas.

$t_{expiman}$: tiempo de exposición teórico arrojado por el modelo.

D_{tierra} : dosis de exposición magnética debido al CM terrestre.

Y el número total de semillas tratadas magnéticamente que germinan es igual a:

$$NT_{SMG} = (NT_S) F(t_{germiman}) \quad (4)$$

donde:

$F(t_{germiman})$: fracción de semillas germinadas debido al CM externo.

La velocidad de germinación teórica, de cada semilla es:

$$v_{germagteo} = \frac{NT_{SMG}}{t_{gerB}} \quad (5)$$

$$v_{germagteo} = \frac{B_{imanteo}^2 \cdot NT_{SM}}{D_{tierra} \sqrt{\left(\frac{4\pi}{3}\right) \frac{F_{gerBiman}}{(F_{comp}/F_{amb})V_{conf}}}} \quad (5a)$$

donde:

NT_{SM} : número total de semillas expuestas al CM.

NT_{SMG} : número total de semillas tratadas magnéticamente que germinan.

$$K_{mag} = \frac{1}{2} \left(\frac{F_{comp} * B_{imanteo}}{B_{imanteo} + B_{tierra}} \right) \quad (6)$$

donde:

K_{mag} : coeficiente de la velocidad germinación.

Tanto la curva logística de Malthus-Verhulst,^(6,14) como la curva de velocidad de germinación modelan muy bien el proceso de germinación de semillas estimuladas magnéticamente; por ello, con ellas se ajustan estas dependencias experimentales:

$$N_{(t)} = \frac{N_k}{1 + (N_k - 1) \exp[-\alpha N_k (t - t_0)]} \quad (7)$$

donde:

$N_{(t)}$: número de semillas germinadas en el tiempo t .

$N_k = NT_{SMG}$: número total de semillas tratadas magnéticamente que germinan.

$\alpha = K_{mag}$: coeficiente de la velocidad germinación.

t_0 : tiempo de germinación de una semilla.

Luego

$$v_k = \frac{dN_{(t)}}{dt} = N_{(t)} \cdot \alpha \cdot [N_k - N_{(t)}] \quad (8)$$

donde:

v_k : velocidad de germinación.

Sin embargo, a la hora de escoger una función, que además de ajustar la curva experimental, sea coherente con un modelo de predicción de los parámetros magnéticos y valores agronómicos para variables, como el porcentaje de germinación de semillas, la tasa de germinación y el tiempo máximo de germinación, una función exponencial creciente general más adecuada es:

$$N_{(t)} = N_k (1 - \exp[-K_{mag} (t_0 - t)]) \quad (9)$$

$$V_{ger} = \frac{d(N_{(t)})}{dt} = -N_k K_{mag} \exp[-K_{mag} (t_0 - t)] \quad (10)$$

$$t_{maxger} = \frac{\ln(N_k) - K_{mag} t_0}{K_{mag}} \quad (11)$$

La comparación de los parámetros de la ecuación (8), las curvas cinéticas de germinación y las predicciones del modelo, permite determinar correctamente, el efecto del campo magnético sobre las semillas y plantas.

Otros indicadores evaluados

Por ciento de Germinación ($G_{\%}$)

Para este cálculo, se utilizó la ecuación (12):

$$G_{\%} = \frac{TS_G}{T_{SS}} * 100 \quad (12)$$

donde:

TS_G : total de semillas germinadas.

T_{SS} : total de semillas sembradas.

Tiempo Medio de Germinación (TMG)

La determinación del TMG se llevó a cabo mediante la ecuación (13).⁽¹¹⁾

$$TMG = \frac{\sum(t \cdot n)}{\sum n} \quad (13)$$

donde:

t = tiempo que tarda cada semilla en germinar.

n = número de semillas germinadas en cada intervalo de tiempo.

Tiempo para el 50 % de germinación (T_{50})

Esta variable se calculó por la ecuación (14).⁽¹⁵⁾

$$T_{50} = \frac{[(N/2 - N_1) * (T_2 - T_1)]}{N_2 - N_1} + T_1 \quad (14)$$

donde:

N : porcentaje final de semillas germinada.

N_1 : porcentaje de semillas por debajo de $N/2$.

N_2 : porcentaje de semillas por encima de $N/2$.

T_1 : días que corresponden a N_1 .

T_2 : días que corresponden a N_2 .

Medida del tallo (cm): se utilizó una regla milimetrada para determinar la altura del tallo, registrándose cada medición desde el nivel del suelo hasta el más alto entrenudo que se formó en cada planta.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento tuvo lugar en el Organopónico "Mayaba 1", municipio Holguín de la provincia Holguín, Cuba, con la siembra el 21 de marzo del 2023.

Para el cálculo de las predicciones teóricas y las dependencias derivadas de ellas, se usaron expresiones de la (1) a la (14), para la adecuada comparación de los resultados teóricos y experimentales.

Semillas

Se usaron semillas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.), variedad híbrida HA-3057. Las semillas fueron preseleccionadas, y se tomaron las que presentaban una morfología uniforme y sin daños visibles, con el fin de garantizar la uniformidad y calidad de cada grupo y del material en general, y así reducir la variabilidad química y biológica.

Se utilizó un diseño de bloques al azar, con dos tratamientos y tres réplicas. El análisis estadístico de los resultados se realizó con el software estadístico R, versión 4.3.3 y RStudio-2024.04.0-735. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey, con un nivel de confianza del 95 %.

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) de un solo factor con el fin de identificar si hay diferencias significativas desde el punto de vista estadístico entre las medias de los grupos o tratamientos analizados. Luego, se efectuó la prueba de Tukey con un intervalo de confianza del 95 % ($\alpha=0,05$) para averiguar qué tratamiento tuvo mayor impacto en las respuestas de las variables estudiadas. El análisis estadístico se realizó utilizando R y RStudio para Windows, versiones 4. 3. 3 y 2024. 04. 0-735, respectivamente.

Tratamiento magnético

La generación del campo magnético se realizó con dispositivos compuestos por imanes permanentes, diseñados y construidos en el Departamento de Física de la Universidad de Holguín, con una densidad de campo magnético máxima de 95 mT, medida con el teslámetro digital “PHIWE” con sensor de efecto Hall y escala hasta 2000 mT. En la [Figura 1a](#), se presenta la configuración empleada para el proceso magnético, y en la [Figura 1b](#), la ubicación del CM en el área donde se situaron las semillas que iban a ser sometidas a tratamiento.

Las semillas fueron colocadas a una distancia de $5 \pm 0,5$ cm de cada imán en la configuración mostrada en la [Figura 1a](#), dentro de un recipiente con dimensiones de $6,00 \times 2,00 \times 1,00$ cm, de modo tal que el volumen de semillas a irradiar magnéticamente, fue de 12 cm^3 , y la densidad de campo magnético en el volumen de semillas de $24 \pm 2 \text{ mT}$, logrando homogeneidad en el proceso de exposición al CM.

Para el estudio, se tuvieron dos tratamientos, un control T1 y un T2, donde se trataron las semillas como se observa en la [Figura 1](#), cada uno con un total de 900 semillas separadas en tres réplicas.

La exposición se realizó durante 35 min, para lograr la dosis de exposición predicha por el modelo ($D_B = 481 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$), luego se llevó a cabo la siembra en bandejas para germinar, seguida de una irrigación destinada a humedecer el sustrato, y de esa manera iniciar el proceso de absorción de agua.

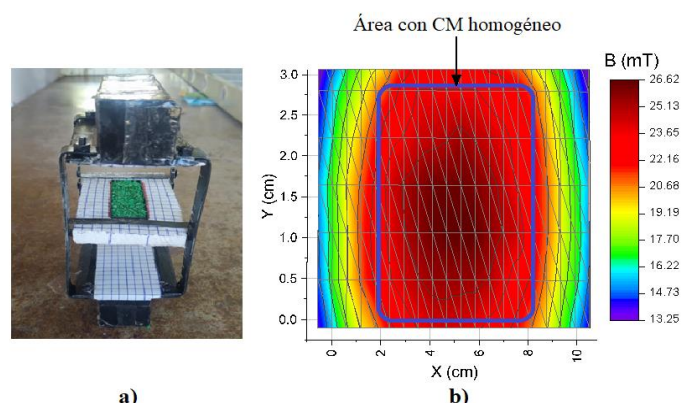


Fig. 1- Instalación para el tratamiento magnético a semillas y distribución del CM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la investigación se analizó, cómo el tratamiento magnético afectó las semillas de tomate, enfocándose en aspectos de germinación y crecimiento temprano, utilizando técnicas estadísticas multivariadas para explorar las conexiones entre los parámetros observados.

Por ciento de Germinación ($G_{\%}$)

El cálculo del $G_{\%}$ se realizó cuando la germinación se mantuvo de manera constante, o lo que es lo mismo, cuando luego de dos conteos consecutivos no se registraron cambios durante el proceso de germinación de todos los tratamientos, se llevaron a cabo seis conteos, hasta que se observó que la tasa de germinación se mantuvo constante a los catorce días tras la siembra.

La [Figura 2](#) muestra la germinación acumulada hasta el día 14 DDS, y en la [Tabla 1](#) se expone los resultados del análisis estadístico.

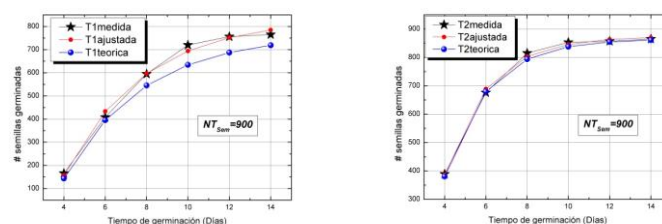


Fig. 2: Por ciento de Germinación por tratamientos. a: Número de semillas germinadas del control. b: Número de semillas germinadas con campo magnético en pre siembra

En la [Figura 2a](#) se observa el número de semillas germinadas para el control T1, para las mediciones experimentales, (puntos y líneas negras), los valores de la curva adaptada en base a la ecuación (8) (marcados en rojo) y los valores teóricos según el

modelo de predicción determinados por la ecuación (4) (puntos y líneas azules). Se nota, que las tres dependencias son análogas funciones del tipo exponencial creciente, con una expresión general semejante a la ecuación (8). Las curvas experimentales y ajustadas son, prácticamente iguales, lo que implica que ambas se ajustan de forma coherente con la ecuación (8). El hecho de que también la curva teórica siga a este comportamiento significa, que la asunción de que las mediciones de control son debidas a que las plantas están sometidas al campo magnético de la tierra, con un tiempo de exposición magnética igual a tiempo promedio de germinación del tomate, para una dosis de exposición magnética de $902,4 \times 10^{-3} \text{ Jm}^{-3}\text{s}$. Esta dependencia es algo menor que la experimental, debido a algunos factores que influyen en la germinación “natural” del tomate, tales como la composición, los parámetros ambientales, tiempo de germinación y otros, fueron tomados como valores medios y no los específicos de la variedad bajo estudio.

En la [Figura 2b](#) se reporta el número de semillas germinadas con CM en pre-siembra, dado por modelo (T2), para las mediciones experimentales (puntos y líneas negra), los puntos de la curva ajustada de acuerdo con la ecuación (8) (puntos y líneas rojos), y los puntos teóricos, de acuerdo con el modelo predictor calculados por la ecuación (4) (puntos y líneas azules). Se nota que las tres dependencias son coherentes con funciones del tipo exponencial creciente, con una expresión general semejante a la ecuación (8). Las tres dependencias son, prácticamente iguales, lo que implica que todas pueden ser descritas por la ecuación (8). El hecho de que también la curva teórica siga a este comportamiento significa, que la asunción de que la germinación de las semillas de tomate es debida a que las plantas están sometidas a la densidad de inducción magnética aplicada, con un tiempo de exposición magnética igual a una dosis de exposición magnética de $481 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$. Este valor implica que, la dosis de exposición debido al campo magnético de la tierra es despreciable respecto a la dosis magnética externa aplicada. Todo ello demuestra la fiabilidad del modelo predictor aplicado.

La germinación del T2 a los 14 DDS fue de 0,96 lo que representa un aumento de 113 % en comparación con el tratamiento control (0,85). Esta diferencia es estadísticamente significativa, lo que sugiere que el TM tiene un efecto positivo y considerable sobre el porcentaje de germinación.

Estos resultados están en concordancia con los obtenidos por Chávez Milla y otros investigadores,⁽¹⁶⁾ quienes expusieron semillas de tomate a CM de 5 mT durante 2h ($D_B = 72 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$), 4h ($D_B = 143 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$) y 7 h ($D_B = 251 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$), y reportan aumento en el porcentaje de germinación para las semillas tratadas con dosis de $143 \text{ Jm}^{-3}\text{s}$, en comparación con el control no tratado, mientras que los otros tratamientos no mostraron diferencias significativas en comparación con el control no tratado, lo cual significa que existe un límite umbral, a partir del cual la exposición de las semillas de tomate, produce buenos resultados y un límite máximo, para el cual también se inhiben la mejoría respecto al control.

El Yazied *et al.*,⁽⁸⁾ también reportan, que el TM a semillas con CM de 0,1; 0,15 y 0,2 T durante tiempos de 1, 5, 10 y 15 min, estimuló la germinación de las semillas (dosis entre $239 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$ y $14,3 \times 10^3 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$), obteniendo los mejores resultados para 0,1 T durante 15 min ($3582 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$), con un aumento del 18 % en comparación con el control no tratado. Se puede observar, que el aumento es del mismo orden que el reportado en este estudio, siendo un 3 % mayor, dado que la dosis magnética aplicada fue superior, sin superar el límite máximo para el cultivo estudiado.

Investigadores⁽¹²⁾ reportaron que el tratamiento de semillas de tomate con CM a 15 y 25 mT durante 5, 15 y 25 min no afectó significativamente la germinación, siendo la dosis de exposición magnética $\leq 373 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$, en todos los casos inferiores a la utilizada en esta investigación.

Lo expuesto anteriormente demuestra, que el modelo predictor reportado en este estudio, predice un valor de la dosis de exposición magnética superior al límite umbral para este cultivo.

Tiempo medio de Germinación (TMG) y tiempo para el 50 % de germinación (T_{50})

Tiempo Medio de Germinación

Esta variable mostró disminuciones significativas para el tratamiento evaluado, en comparación con el control no tratado ([Tabla 1](#)).

Los resultados experimentales mostrados en la tabla ANOVA y la prueba de Tukey indican, que el TM tiene un efecto significativo sobre el TMG en comparación con el tratamiento control, pues esta variable mostró una disminución de 20 % en comparación con el control para $D_B = 481 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$,

lo que sugiere que el TM en semillas es un método efectivo para acelerar la germinación.

Tabla 1- Análisis estadístico de $G\%$, TMG y T_{50}

Tratamientos	$G\%$	TMG (Días)	T_{50} (Días)
T1 (Control)	85,00 a	7,08 a	5,79 a
T2 (ST)	96,11 b	5,70 b	4,30 b
Diferencia	11,11	1,39	1,49
EE (%)	2,06	0,42	0,40
p-valor	0,00161	<0,0001	<0,0001

Columnas con letras diferentes difieren significativamente para el test de Tukey al 95 % de confianza ($\alpha = 0,05$)

TMG_{máx}=10 días para el control

TMG_{máx}=9 días para semillas con CM

Estos resultados tienen importantes implicaciones prácticas. La capacidad de acelerar la germinación de las semillas puede ser crucial en diversos contextos, como la producción agrícola, la restauración de ecosistemas o la propagación de especies de interés. Un menor TMG puede traducirse en una germinación más rápida y uniforme, lo que puede mejorar el establecimiento y el crecimiento de las plántulas. En conclusión, los hallazgos de este estudio indican que el TM en semillas es efectivo para reducir el TMG.

Martínez *et al.*⁽¹⁷⁾ describen, que la exposición de las semillas de tomate a un CM resultó en una disminución del TMG. Asimismo indicaron, que una exposición continua de 24 h a 250 mT ($D_B = 2150 \times 10^3 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$), tuvo el mayor efecto en esta variable.

Además, el TMG fue de 3,72 días cuando las semillas se pre trataron durante 25 min, con un campo magnético de 15 mT, en comparación con 4,06 días en el grupo de control.⁽¹²⁾ Para una disminución del 9 % del TMG para una $D_B = 134 \text{ KJm}^{-3}\text{s}$. La comparación entre este estudio y lo reportado en el presente trabajo, demuestra que la disminución del tiempo medio de germinación es proporcional a la dosis de exposición magnética, debido a un campo magnético externo aplicado.

Kadiaglu *et al.*⁽¹¹⁾ descubrieron, que la exposición de semillas de tomate durante 5 min a CM en un rango de 15-17 mT no produjo cambios significativos en el TMG. Los valores para las semillas tratadas fueron de $3,9 \pm 0,8$ días y $4,0 \pm 0,5$ días para el control, respectivamente.

Tiempo para el 50 % de germinación (T_{50})

El TM en las semillas tuvo un efecto positivo en el T_{50} , de modo que para el T2 disminuyó en 1,49 días con respecto al del control no tratado (Tabla 1). Esto afirma todo lo expresado con anterioridad.

En la Figura 3, se reporta la velocidad de germinación para el control (puntos y líneas negras) y las semillas expuestas en pre-siembra (puntos y líneas rojas). Se muestra, que para la dosis de exposición magnética externa aplicada, inicialmente la velocidad de germinación es mayor que la del control, y a partir del sexto días es menor respecto al control. Ambas curvas son análogas a la reportada en la ecuación (9), de lo cual se infiere la fiabilidad de las predicciones del modelo predictor reportado.

El análisis estadístico demostró que la exposición de las semillas a un CM antes de la siembra, resultó en un aumento de la velocidad de germinación, en la etapa más importante de la germinación (Figura 3).

Investigaciones recientes reportan la influencia del TM en la velocidad de germinación, planteando que el índice de velocidad de germinación aumentó para las variedades de tomate con las que experimentaron, y también añaden que un incremento en el tiempo de exposición resultó en una reducción de la rapidez de la germinación.⁽¹⁸⁾

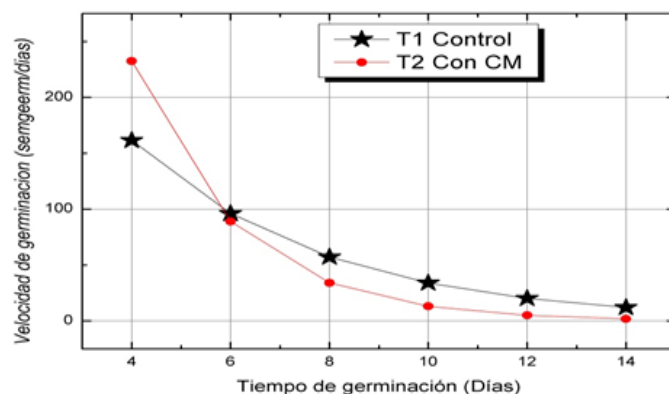


Fig. 3- Velocidad de germinación para el control y las semillas con CM

Longitud del Tallo (cm)

En la Tabla 2, se ha reportado la altura del tallo (cm) a los 45, 60 y 70 DDS. La longitud del tallo mostró un aumento progresivo en cada medición realizada. Se pudo comprobar, que a los 45 DDS, la diferencia entre los valores medios de esta variable para los tratamientos estudiados fue de 0,52 cm, aunque se

notó un incremento de la longitud del tallo en las plantas procedentes de semillas tratadas, no existió diferencias significativas (Tabla 2).

A los 60 DDS se observó un incremento en ambos tratamientos, con medias de 37,14 cm y 50,92 cm para el control y el T2, respectivamente.

El estudio estadístico confirmó que hubo variaciones importantes en las mediciones en esta ocasión (Tabla 2).

Al llegar a los 70 DDS, se llevó a cabo una nueva evaluación de la longitud del tallo de las plantas, observándose una variación de 18,10 cm en los promedios de los dos tratamientos, siendo la media de las plantas obtenidas de semillas tratadas notablemente más alta ($p < 0,05$), tal como se muestra en la Tabla 2.

Estos resultados demuestran, que el TM en semillas de tomate, estimuló el crecimiento de las plántulas, lo cual puede traducirse en el desarrollo de plantas más vigorosas y que, a su vez, aumenten los índices productivos.

Otros investigadores han reportado incrementos de esta variable para plántulas procedentes de semillas expuestas a CM, tanto estáticos como variables, (11,20) con aumentos de 1,4 cm en la altura media de las plantas del tratamiento de semillas expuestas a CM en el rango de 15-17 mT durante 5 min. También indican, que el TM estimuló el crecimiento de las plantas en condiciones de déficit de hierro, alcanzando un aumento del 66 % el de las plantas tratadas, en comparación con el control no tratado. (19)

Tabla 2- Altura del tallo (cm) a los 45, 60 y 70 DDS

Tratamientos	45 DDS	60 DDS	70 DDS
T1 (Control)	17,62 a	37,14 a	41,20 a
T2 (ST)	18,14 a	50,92 b	59,30 b
Diferencia	1,49	13,78	18,10
EE (cm)	0,52	1,34	1,65
p-valor	0,492	<0,0001	<0,0001

Columnas con letras diferentes difieren significativamente para el test de Tukey al 95 % de confianza ($\alpha = 0,05$)

Lo anterior es coherente con los resultados obtenidos, partiendo de las variables predichas por el modelo predictor para las plántulas de tomate.

CONCLUSIONES

La validación experimental del modelo fenomenológico propuesto, permitió determinar que la dosis óptima de exposición magnética ($481 \text{ KJ m}^{-3} \text{ s}$), aplicada mediante un campo magnético estacionario

de $24 \pm 2 \text{ mT}$ durante 35 min, incrementa, significativamente, el porcentaje de germinación de semillas de tomate variedad HA-3057. Este tratamiento logró una germinación del 96,1 % frente al 85,0 % del control, demostrando la precisión predictiva del modelo y la efectividad de la metodología, basada en la dosis de exposición magnética como parámetro fundamental. Además de mejorar la germinación, el tratamiento magnético evidenció efectos positivos en el desarrollo temprano de las plantas, reflejados en una reducción del tiempo medio de germinación y un aumento de la altura del tallo en las etapas iniciales. Estos resultados sugieren que la bioestimulación magnética actúa como un método físico no invasivo, capaz de optimizar procesos fisiológicos clave, favoreciendo tanto la emergencia rápida, como el crecimiento vigoroso de las plántulas, lo que puede traducirse en mejoras en la productividad agrícola.

Finalmente, se recomienda ampliar la validación del modelo en otras variedades y cultivos, así como profundizar en el estudio de los mecanismos fisiológicos y bioquímicos subyacentes a la estimulación magnética. La estandarización de la dosis de exposición magnética facilita la comparación entre estudios, y promueve la adopción de esta técnica como una alternativa sostenible y eficiente para la mejora de la germinación y el desarrollo inicial en la agricultura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BONILLA SEGOVIA, J. S.; DÁVILA ROJAS, F. A.; VILLA QUISHPE, M. W.. "Estudio del uso de técnicas de inteligencia artificial aplicadas para análisis de suelos para el sector agrícola". *Recimundo*. 2021, 5(1), 4-19. [https://doi.org/10.26820/recimundo/5.\(1\).enero.2021.4-19](https://doi.org/10.26820/recimundo/5.(1).enero.2021.4-19)
- MICHALAK, I. *et al.*. "Germination of soybean seeds exposed to the static/alternating magnetic field and algal extract". *Engineering in Life Sciences*, 2019. 19(12), 986-999. <https://doi.org/10.1002/elsc.201900039>
- KONEFAŁ-JANOCHA, M *et al.*. "The effect of stationary and variable electromagnetic fields on the Germination and early growth of radish (*Raphanus sativus*)". *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019. 28(2), 709-715. <https://doi.org/10.15244/pjoes/84920>

4. ZEPEDA-BAUTISTA, R.; VARGAS, J. V.; DOMÍNGUEZ-PACHECO, F. A.; RODRÍGUEZ-REBOLLAR, H.; HERNÁNDEZ-AGUILAR, C. "Campo electromagnético en plántulas, rendimiento y calidad de maíz en condiciones de campo". *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2019. **10**(3), 629-642. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1561>
5. ISAAC ALEMÁN, E.; BARRERA ROCA, L.; FUNG BOIX, Y.; FERRER DUBOIS, A. E. "Efecto del tratamiento electromagnético de frecuencia extremadamente baja en el proceso de germinación de habichuela (*Vigna unguiculata* L.)". *Centro Agrícola*, 2020. **47**(3), 51-58. ISSN papel: 0253-5785 ISSN on line: 2072-2001.
6. PIETRUSZEWSKI, S.; MARTÍNEZ, E. "Magnetic field as a method of improving the quality of sowing material: A review". *International Agrophysics*, 2015. **29**(3), 377-389. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0044>
7. TORRES, C.; DÍAZ, J.; CABAL, A. "Efecto de campos magnéticos en la germinación de semillas de arroz (*Oryza sativa* L.) y tomate (*Solanum lycopersicum* L.)". *Redalyc*, 2008. **26**(2), 177-185. ISSN: 0120-9965.
8. EL YAZIED, A. A.; SHALABY, O. A.; EL GIZAWY, A. M.; KHALF, S. M.; EL SATAR, A. "Effect of Magnetic Field on Seed Germination and Transplant Growth of Tomato". *Journal of American Science*, 2011. **7**(12), 306-312. <http://www.americanscience.org>
9. POINAPEN, D.; BROWN, D. C. W.; BEEHARRY, G. K. "Seed orientation and magnetic field strength have more influence on tomato seed performance than relative humidity and duration of exposure to non-uniform static magnetic fields". *Journal of Plant Physiology*, 2013. **170**(14), 1251-1258. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2013.04.016>
10. JEDLIČKA, J.; PAULEN, O.; AILER, Š. "Influence of magnetic field on germination, growth and production of tomato". *Potravinarstvo*, 2014. **8**(1), 150-154. ISSN 1337-0960 (online). <https://doi.org/10.5219/349>
11. KADIAGLU, N.; ERMIS, S.; OKTEM, G.; DEMIR, İ. "Magnetopriming enhanced seed germination in six vegetable species: tomato, pepper, onion, cauliflower, cabbage and carrot". *Mustafa Kemal Üniversitesi Tarım Bilimleri Dergisi*, 2023. **28**(3), 557-567. <https://doi.org/10.37908/mkutbd.1284048>
12. FEIZI, H.; SAHABI, H.; MOGHADDAM, P. R.; SHAHTAHMASSEBI, N. "Impact of Intensity and Exposure Duration of Magnetic Field on Seed Germination of Tomato (*Lycopersicon esculentum* L.)". *Notulae Scientia Biologicae*, 2012. **4**(1), 116-120. <https://doi.org/10.15835/nsb417324>
13. EFTHIMIADOU, A. et al. "Effects of presowing pulsed electromagnetic treatment of tomato seed on growth, yield, and lycopene content". *Scientific World Journal*, 2014. **2014**(1), 1-6. <https://doi.org/10.1155/2014/369745>
14. MATWIJCZUK, A.; KORNAZYŃSKI, K.; PIETRUSZEWSKI, S. "Effect of magnetic field on seed germination and seedling growth of sunflower". *International Agrophysics*. 2012. **26**(1), 271-278. <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0039-1>
15. BACCHETTA, G. et al. *Conservación ex situ de plantas silvestres*. (eds). 2008. Principado de Asturias. La Caixa. 378 pp.
16. CHÁVEZ MILLA, J. M.; SANTAMARÍA BALDERA, N.; AFILER HORNA, D. "Efecto del campo magnetico de imanes orientados segun el campo terrestre en la germinacion y crecimiento de la plantula de *Lycopersicon esculentum* Mill, "tomate", Chachapoyas 2015". *Revista de Investigación Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería*, 2018. **2**(2), 45-49. ISSN 2414-8822 / ISSN(e) 2520-0356. <https://doi.org/10.25127/ucni.v3i2.318>
17. MARTÍNEZ, E.; CARBONELL, M. V.; FLÓREZ, M.; AMAYA, J. M.; MAQUEDA, R. "Germination of tomato seeds (*Lycopersicon esculentum* L.) under magnetic field". *International Agrophysics*, 2009. **23**(1), 45-49 ISSN: 0236-8722 / ISSN(e) 2300-8725.
18. KUMARI, N.; VERMA, S.; SHARMA, V. "Manipulating tomato plant electric signaling system by microwave radiation to enhance crop productivity and nutritional value". *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018. **154** (September), 330-340. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.020>
19. TAIMOURYA, H. et al. "Magnetic treatment of culture medium enhance growth and minerals uptake of strawberry (*Fragaria×ananassa* Duch.) and tomato (*Solanum lycopersicum*) in Fe deficiency conditions". *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2017. **8**(9), 1414-1436. ISSN 2229-5518.
20. DE SOUZA, A.; SUEIRO, L.; GARCÍA, D.; PORRAS, E. "Extremely low frequency non-uniform magnetic fields improve tomato seed germination and early seedling growth". *Seed Science and Technology*, 2010. **38**(1), 61-72. <https://doi.org/10.15258/sst.2010.38.1.06>

DECLARACIÓN CONFLICTO DE INTERESES

No se declaran conflictos entre los autores

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Yadir Hidalgo Peña: diseño y seguimiento de los experimentos de campo y las mediciones correspondientes, redacción, discusión, revisión y aprobación del manuscrito final.

Pedro A Mariño Castellanos: diseño y seguimiento de los experimentos de campo y las mediciones

correspondientes, redacción, discusión, revisión y aprobación del manuscrito final.

Ernesto R. Córdova Aguilera: diseño y seguimiento de los experimentos de campo y las mediciones correspondientes, así como en la redacción y discusión del manuscrito final.

Eduardo Fernández Santiesteban: diseño y seguimiento de los experimentos de campo y las mediciones correspondientes, así como en la redacción y discusión del manuscrito final.