

Modalidad: Artículo profesional y/o de investigación

Análisis del proceso de germinación de semillas de tomate bajo magneto estimulación usando la metodología de Taguchi

Hernando Jiménez^{1,2}, Lucas de los Campos², María Victoria Panzl³, Diego Quiroga⁴,
María Laura Umpiérrez²

¹Universidad Antonio Nariño- Bogotá Colombia

²Departamento de Sostenibilidad Ambiental, Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC)

³Departamento de Alimentos, Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC)

⁴Departamento de Mecatrónica, Logística y Biomédica, Universidad Tecnológica del Uruguay (UTEC)



hernando.jimenez@utec.edu.uy

Resumen

En este trabajo se presenta la aplicación de la metodología Taguchi en el diseño experimental del proceso de exposición a campos magnéticos en semillas de tomate (*Lycopersicon esculentum*, *Solanaceae*) de una variedad comercial certificada, como modelo de cultivo intensivo, variando las condiciones de intensidad de campo magnético y tiempo de exposición. La exposición de las semillas a campos magnéticos se llevó a cabo mediante un sistema de bobinas de Helmholtz conectadas en serie y alimentadas por una fuente de corriente continua. Por las características de este tipo de bobina se generaron campos cuasiuniformes en la región central del arreglo experimental. Las intensidades del campo magnético utilizadas fueron 400, 500 y 600 μT y los tiempos de exposición se fijaron en 60, 120 y 180 s. Estas variables (intensidad y tiempo de exposición) actúan como variables independientes del sistema y se evalúan en tres niveles: bajo, medio y alto. La

longitud de raíz y el índice de velocidad de germinación fueron elegidos variables de respuesta para el diseño Taguchi y optimizados de manera «más grande es mejor» para la relación señal-ruido. Los resultados revelaron que exponer las semillas a campos de mayor intensidad durante períodos cortos de tiempo produce resultados beneficiosos en el proceso de germinación.

Palabras clave: Campo magnético, Helmholtz, diseño de experimentos.

Abstract

*This study presents the application of the Taguchi methodology in the experimental design of magnetic field exposure on tomato seeds of a commercial variety (*Lycopersicon esculentum*, Solanaceae) as a model for intensive crop cultivation, varying the conditions of magnetic field intensity and exposure time. The exposure of the seeds to magnetic fields was carried out by using a Helmholtz coils system connected in series and powered by a direct current supply. Quasi-uniform fields were generated in the central region of the experimental arrangement. The intensities of the magnetic field used were 400, 500 and 600 μT and the exposure times were fixed at 60, 120 and 180 s. These variables (intensity and exposure time) act as independent variables of the system, evaluated at three levels: low, medium and high. Root length and coefficient of velocity of germination index were chosen as response variables for the Taguchi design, which were optimized in a “bigger is better” criterion for the signal/noise ratio. The results revealed that exposing seeds to higher intensity fields for shorter periods of time produces beneficial effects in the germination process.*

Keywords: Magnetic field, Helmholtz, experimental design.

Introducción

El uso de campos magnéticos en la industria agrícola es un área de estudio que ha mostrado ser de gran interés para la comunidad científica en los últimos años, en los que se han realizado experimentos que involucran campos magnéticos

permanentes mediante el uso de imanes, campos magnéticos variables producidos mediante el uso de bobinas alimentadas con corriente AC y campos constantes que son producidos por corrientes DC. Estos se han aplicado en procesos de germinación de semillas, en exposición de plantines presiembra, en períodos de floración, en fertilizantes y en aguas de riego principalmente (Martínez et al., 2009). Los resultados reportados reflejan aumentos significativos en la velocidad de germinación, el vigor de las semillas, la longitud del tallo principal, el número de rizomas, el número de macollos, la masa fresca y la masa seca de los cultivos expuestos (Koukounaras et al. 2023). Los reportes del uso de estas técnicas en Uruguay son aparentemente nulos hasta ahora, lo que contrasta con los reportes en el ámbito regional, donde su aplicación ha dado resultados prometedores. Los investigadores Zúñiga et al. (2016) abordaron la exposición de plantas, semillas y biofertilizantes a campos magnéticos con intensidades de campo de entre 10 a 300 mT y tiempos de exposición de entre 1 min a 1 h. Los hallazgos demuestran que la exposición favorece el metabolismo y crecimiento de las plantas.

El diseño de experimentos es una herramienta que busca, a través de pruebas piloto debidamente planificadas, generar conocimiento sobre un proceso o sistema aplicando el método científico. Esta herramienta consta de una amplia gama de técnicas estadísticas para la optimización de problemas en procesos de manufactura, diseño y procedimientos experimentales en general. Dentro de estas herramientas se destaca el diseño experimental de Taguchi, que son diseños ortogonales que tienen como objetivo primordial estimar los efectos principales e interacciones en el análisis de señal-ruido (Awty-Carroll et al., 2020). En el modelo de Taguchi, los factores son variables físicas o químicas de un experimento. Cada factor puede tener uno a más niveles de aplicación, en el caso de este trabajo los niveles son bajo, medio y alto para cada variable; así pues, un tratamiento es el resultado de la combinación entre factores y niveles. Los criterios de evaluación general del diseño experimental dependen de las variables de respuesta, que son las variables dependientes en el experimento. Se pueden tener tantas variables de

respuesta como se desee evaluar, siempre que estas dependan directamente de los factores del experimento.

En este trabajo se muestran los resultados de pruebas piloto para la evaluación de los efectos de la aplicación de campos magnéticos DC de baja intensidad (del orden de μT) en semillas de tomate de una variedad comercial. Se elige el tomate como modelo de cultivo intensivo dada su importancia nacional y regional, al ser el segundo cultivo hortícola de importancia en el ámbito mundial (Pal et al., 2023). Los resultados de estas pruebas piloto se utilizan como insumo para la realización de un diseño Taguchi que permita optimizar el proceso de experimentación.

Metodología

Montaje experimental

Para llevar a cabo el proceso de experimentación se utilizó un sistema de generación de campo magnético consistente en un arreglo de dos bobinas de Helmholtz de 15 cm de radio y 20 espiras de conductor de cobre; se conectaron en serie a una fuente de poder DC. Los dos factores de estudio en este trabajo fueron la intensidad de campo y el tiempo de exposición, cada uno fue evaluado en tres niveles: bajo, medio y alto. Los niveles para el factor de intensidad de campo fueron 400, 500 y 600 μT , mientras que para el factor de tiempo de exposición se fijaron en 60, 120 y 180 s. La intensidad de campo magnético generado por las bobinas de Helmholtz se puede calcular utilizando la ley de Biot-Savart, acorde con el principio de superposición de campos, de acuerdo con la ecuación 1:

$$B = \frac{n\mu_0}{4\pi} \left(\oint_{l_1} \frac{I_1(dl_1 \times \hat{r}_1)}{r_1^3} + \oint_{l_2} \frac{I_2(dl_2 \times \hat{r}_2)}{r_2^3} \right) \quad (1)$$

Donde μ_0 es la permeabilidad del espacio libre y \hat{r} es el vector de posición desde un elemento diferencial de corriente $I d\vec{l}$ hasta un punto p en el espacio, en el que se evalúa la intensidad del campo magnético generado. Considerando que el radio R de las dos bobinas es idéntico, que la distancia de separación entre las bobinas es R , que las bobinas tienen N vueltas de conductor y que por las bobinas circula una corriente I , se puede demostrar que se genera una zona de campo magnético uniforme B en la región central de las bobinas, que es la zona en la cual se posicionan las semillas para ser expuestas a campo (ver gráfico 1).

La intensidad del campo magnético en la región central de las bobinas estará dada por la ecuación 2:

$$B = \frac{8\sqrt{5}}{25} \frac{NI\mu_0}{R} \quad (2)$$

Donde μ_0 representa la permeabilidad magnética del espacio libre.

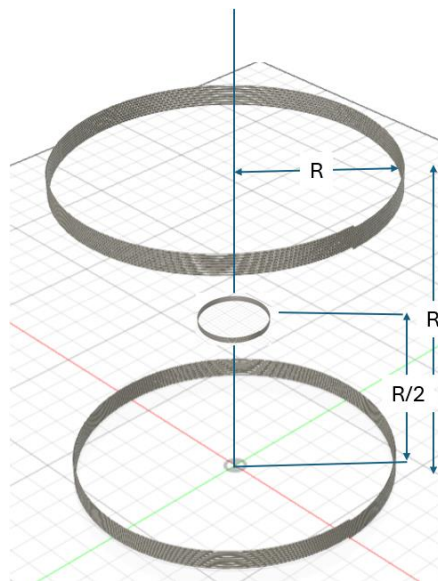


Gráfico 1. Esquema del montaje experimental para magneto estimulación de semillas

Una vez realizada la exposición a las diferentes condiciones de campo magnético mencionadas, las semillas fueron incubadas en cámara de germinación en condiciones controladas de HR (90 %) y temperatura (ciclos alternantes de 20/30°C - 16/8 h) (Organización Internacional de Normalización de Semillas [ISTA], 2016). Se utilizó como material de germinación papel germinativo, placas de Petri y agua destilada, estériles. En total, por cada ensayo se analizaron cinco semillas por réplica con tres réplicas en cada ensayo, incluyendo los ensayos control, con semillas comerciales certificadas *Enza Zaden Elpidia F1*. El período de incubación fue de catorce días, durante el cual se registró la germinación cada día. Al finalizar el período de incubación se midió la longitud de raíz usando un calibre micrométrico. El proceso de ruptura de dormición se realizó acorde a las recomendaciones del ISTA.

Diseño experimental Taguchi

Para el diseño experimental se escogió un arreglo ortogonal de Taguchi L9 (3²), que consta de nueve experimentos que permiten las combinaciones posibles de los dos factores de estudio (intensidad de campo y tiempo de exposición) y los tres niveles de análisis para cada factor (bajo, medio y alto). El proceso del diseño experimental requirió los siguientes pasos:

- Determinación de las variables de estudio a optimizar (variables dependientes-respuesta del sistema). En este caso se escogió la longitud de radícula y el índice de velocidad de germinación (IVG). Este índice se determina mediante la ecuación 3:

$$IVG = \sum \frac{n_i}{t_i} \quad (3)$$

Donde n_i representa el número de semillas germinadas en un determinado tiempo t_i .

- Selección de los factores y los niveles de estudio. Los factores de estudio los constituyen la intensidad de campo magnético y el tiempo de exposición, que se evalúan en tres niveles: bajo, medio y alto. La magnitud de los niveles de campo depende de las características técnicas que ofrecía el montaje experimental descrito, mientras que los niveles de tiempo se determinaron acorde a los reportes de la literatura para este tipo de ensayos (Moon y Chung, 2000).
- Selección del arreglo ortogonal adecuado. Se seleccionó un arreglo L9, que permite el análisis de dos factores con tres niveles de estudio.
- Experimentación y análisis de resultados utilizando análisis de varianza.
- Selección de los niveles óptimos de los parámetros de estudio.
- Verificación de los parámetros óptimos del proceso mediante confirmación experimental.

Para determinar los efectos de las fuentes de ruido en el proceso experimental, cada experimento contó con tres réplicas bajo las mismas condiciones experimentales, con cinco semillas en cada una de las réplicas para un total de quince semillas por cada experimento.

Para el proceso de optimización existen tres criterios en el modelo Taguchi: «más grande es mejor», el cual se usa cuando se quiere maximizar la variable de respuesta; «nominal es mejor», usado cuando se busca un valor específico en la variable de respuesta, y «menor es mejor», cuando se busca que los valores de la variable de respuesta sean lo más pequeños posibles. En este caso de estudio se escogió el criterio de «más grande es mejor», acorde con las variables de respuesta mencionadas. El ajuste de este criterio de optimización de las medias en la relación señal-ruido se realiza mediante la ecuación 4:

$$SNL = -10 \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right) \quad (4)$$

Donde SNL es la relación de señal-ruido más grande, n es el número de repeticiones hechas para cada combinación experimental e Y_i es el valor de la respuesta para cada ensayo experimental. Se llevaron a cabo nueve experimentos y una muestra de control con tres réplicas cada una, como muestra la tabla 1.

Tabla 1. Arreglo experimental para el proceso de magneto estimulación de semillas

Tratamiento	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
Control ($B = 0$; $t = 0$)	C1	C2	C3
T1 ($B = 400 \mu T$; $t = 60$ s)	T1R1	T1R2	T1R3
T2 ($B = 400 \mu T$; $t = 120$ s)	T2R1	T2R2	T2R3
T3 ($B = 400 \mu T$; $t = 180$ s)	T3R1	T3R2	T3R3
T4 ($B = 500 \mu T$; $t = 60$ s)	T4R1	T4R2	T4R3
T5 ($B = 500 \mu T$; $t = 120$ s)	T5R1	T5R2	T5R3
T6 ($B = 500 \mu T$; $t = 180$ s)	T6R1	T6R2	T6R3
T7 ($B = 600 \mu T$; $t = 60$ s)	T7R1	T7R2	T7R3
T8 ($B = 600 \mu T$; $t = 120$ s)	T8R1	T8R2	T8R3
T9 ($B = 600 \mu T$; $t = 180$ s)	T9R1	T9R2	T9R3

Resultados

Las semillas expuestas a campo magnético se sometieron a un período de incubación de catorce días, en el cual se pudo registrar un tiempo de germinación de semillas de diez días para alcanzar el 100 % de germinación en el experimento, la primera germinación se observó el día dos del tratamiento T5R2 ($B = 500 \mu T$; $t = 120$ s). Con los datos de germinación acumulada se construyeron las curvas de germinación de cada ensayo, estas se ajustaron utilizando un modelo logístico Hill de cuatro factores. En el gráfico 2 se observan los datos correspondientes a la germinación acumulada de los controles y su correspondiente ajuste logístico,

mientras que en el gráfico 3 se muestran los ajustes completos de todos los tratamientos contrastados con el control. En el gráfico 2 se observa una alta correlación de los resultados experimentales con los modelos matemáticos de crecimiento poblacional aplicado a los procesos de germinación de semillas. Asimismo, se puede apreciar que los tratamientos T4 ($B = 500 \mu T$; $t = 60 \text{ s}$), T5 ($B = 500 \mu T$; $t = 120 \text{ s}$), T7 ($B = 600 \mu T$; $t = 60 \text{ s}$) y T8 ($B = 600 \mu T$; $t = 120 \text{ s}$) tienen curvas de germinación acumulada que están por encima de la curva de la muestra control, lo que indica cualitativamente que estos tratamientos mostraron ser benéficos para el proceso de germinación (gráfico 3).

Usando los datos de germinación acumulada se calculó el índice de velocidad de germinación según la ecuación 3. La longitud radicular se determinó mediante medida directa de la radícula con calibre. Los resultados de longitud radicular se muestran en el gráfico 4.

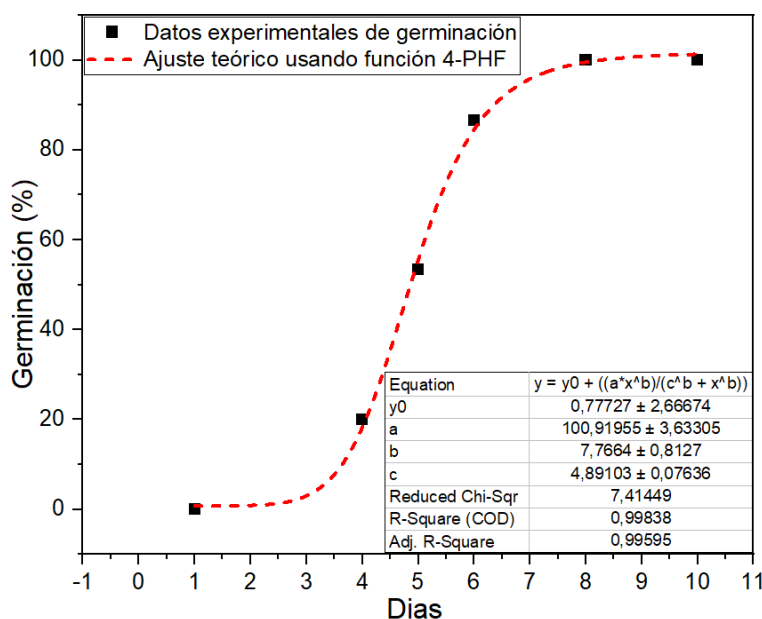


Gráfico 2. Germinación acumulada (%) de las muestras control y ajuste 4-PHF

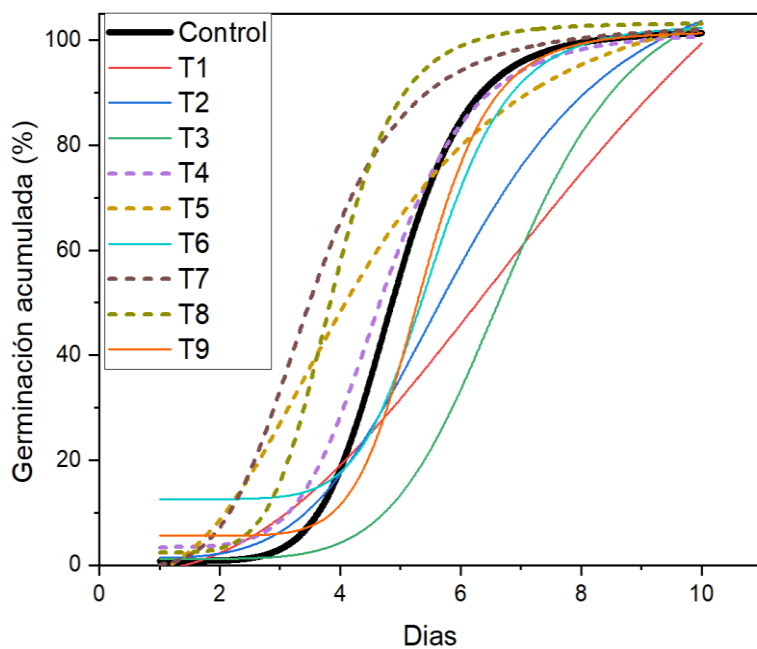


Gráfico 3. Ajustes 4-PHF de los tratamientos de germinación. Se muestra el porcentaje (%) de germinación acumulada por día para cada tratamiento y control

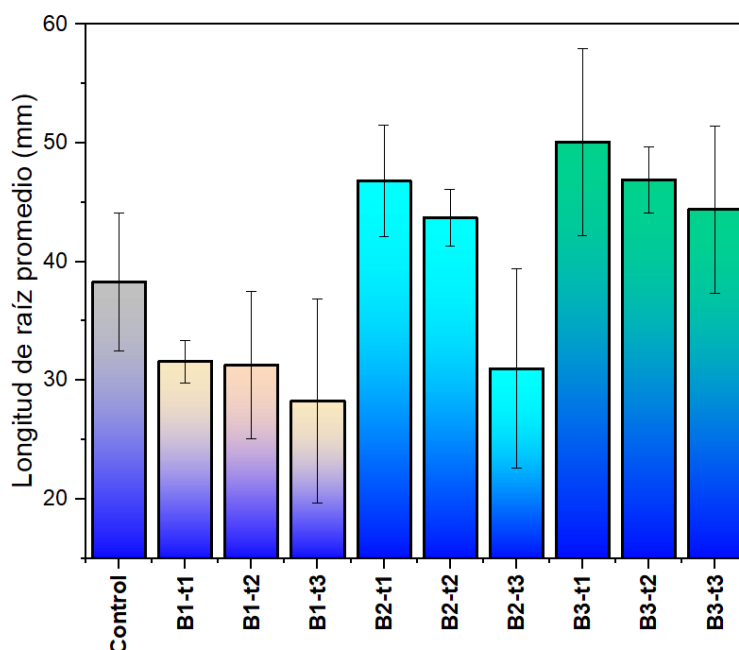


Gráfico 4. Longitud de radícula promedio (mm) para cada tratamiento y control de magneto estimulación de semillas con su desviación estándar

Utilizando el software Minitab se realizó el diseño de Taguchi para las dos variables de respuesta. La tabla 2 muestra el análisis de modelo lineal para la relación señal-ruido de los factores de estudio. Teniendo en cuenta que el nivel de confianza del proceso experimental fue del orden del 95 se puede deducir que los campos de baja intensidad resultan críticos en la variable de respuesta ya que su P valor está por debajo de 0,05. El nivel de ajuste de este análisis se registró en el 92,07 % que, si bien se puede considerar, indica que se requiere de una mayor población muestral para tener más fiabilidad de los resultados. El análisis de varianza de la relación señal-ruido evidenció que el factor de intensidad de campo resulta ser significativo en el proceso de magneto estimulación de semillas, ya que su P valor, registrado en 0,006, es menor al nivel de significancia de 0,05. Estos mismos comportamientos de los factores se aprecian para los análisis de modelo lineal (tabla 3) y análisis de varianza para las medias donde el P valor del campo registró un valor de 0,011.

La tabla de respuestas para la relación señal-ruido y para las medias de los factores de estudio (tabla 4) permite constatar que la intensidad del campo magnético aplicado a las semillas es el factor que tiene mayor incidencia sobre el proceso de germinación al estar categorizado como 1.

Los gráficos 5 y 6 muestran los efectos principales para la relación señal-ruido y para las medias de los factores de estudio respectivamente. El gráfico 5 muestra que los valores que maximizan la respuesta al proceso de germinación de semillas están relacionados con campos de alta intensidad aplicados en tiempo intermedio. Asimismo, el gráfico 6 muestra que el factor que tiene mayor incidencia en el proceso germinativo es la intensidad de campo magnético, ya que tiene una mayor pendiente que el factor de tiempo de exposición.

Tabla 2. Análisis de modelo lineal. Relación señal-ruido para los factores de estudio

Análisis Taguchi: RL, IVG vs. campo, tiempo				
Análisis de modelo lineal: relación señal-ruido vs. campo, tiempo				
Coeficientes estimados del modelo para la relación señal-ruido				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constante	27,611	0,2023	13,648	0,000
Campo 400 μ T	-16,485	0,2861	-5.762	0,005
Campo 500 μ T	0,6367	0,2861	2.225	0,090
Tiempo 600 s	0,2045	0,2861	0,715	0,514
Tiempo 120 s	0,7628	0,2861	2,666	0,056

Tabla 3. Análisis de modelo lineal. Valores medios para los factores de estudio

Análisis de modelo lineal: medias vs. campo, tiempo				
Coeficientes estimados del modelo para las medias				
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constante	201,959	0,5925	34,088	0,000
Campo 400 μ T	-43,326	0,8379	-5,410	0,006
Campo 500 μ T	0,6009	0,8379	0,717	0,513
Tiempo 600 s	18,017	0,8379	2,150	0,098
Tiempo 120 s	0,6591	0,8379	0,787	0,476

Tabla 4. Respuestas relación señal-ruido y medias

Respuesta relación señal-ruido			Respuesta para medias	
Más grande es mejor	Campo	Tiempo	Campo	Tiempo
1	1,113	2,966	15,66	22,00
2	3,398	3,524	20,80	20,86
3	3,773	1,794	24,13	17,74
Delta	2,660	1,730	8,46	4,26
Ranking	1	2	1	2

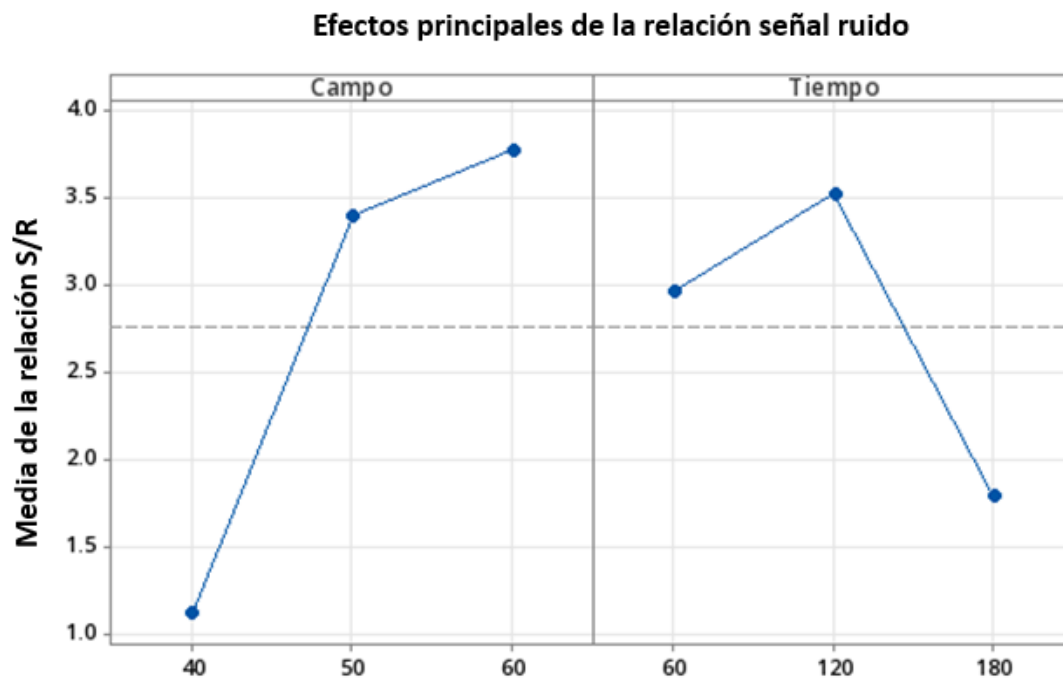


Gráfico 5. Efectos principales de la relación señal-ruido ($B \times 10^{-5}T$; $t(s)$)

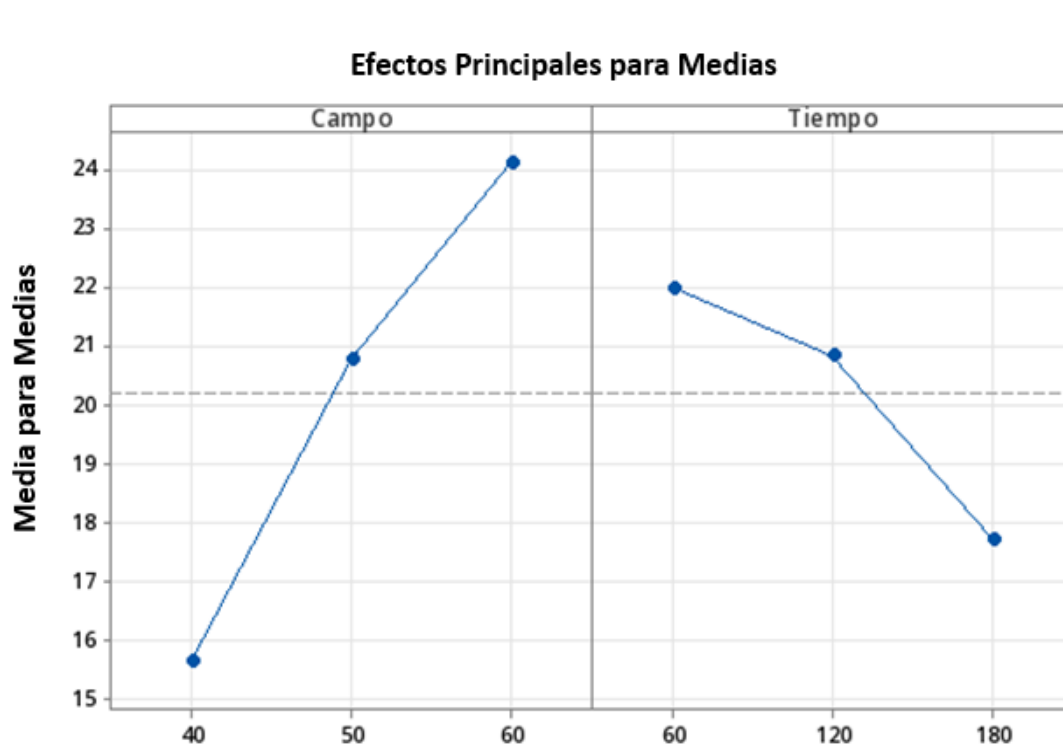


Gráfico 6. Efectos principales para las medias de los factores de estudio ($B \times 10^{-5}T$; $t(s)$)

Para realizar una corroboración experimental de los resultados del modelo Taguchi se procedió a graficar el índice de velocidad de germinación en un mapa de calor contra los factores de intensidad de campo magnético y tiempo, también se hizo este tipo de gráfico para el índice de Abbot (gráficos 7 y 8). Este índice relaciona la germinación de semillas expuestas a tratamiento con las germinadas en el control. El índice de Abbot se utiliza generalmente para evaluar la eficacia de un tratamiento en términos de rendimiento contrastados con muestras sin tratar. En los gráficos se puede ver que los mayores valores, tanto para el índice de velocidad de germinación como para el índice de Abbot, se presentan para campos de intensidad alta y en valores de tiempo correspondientes al nivel medio del diseño experimental.

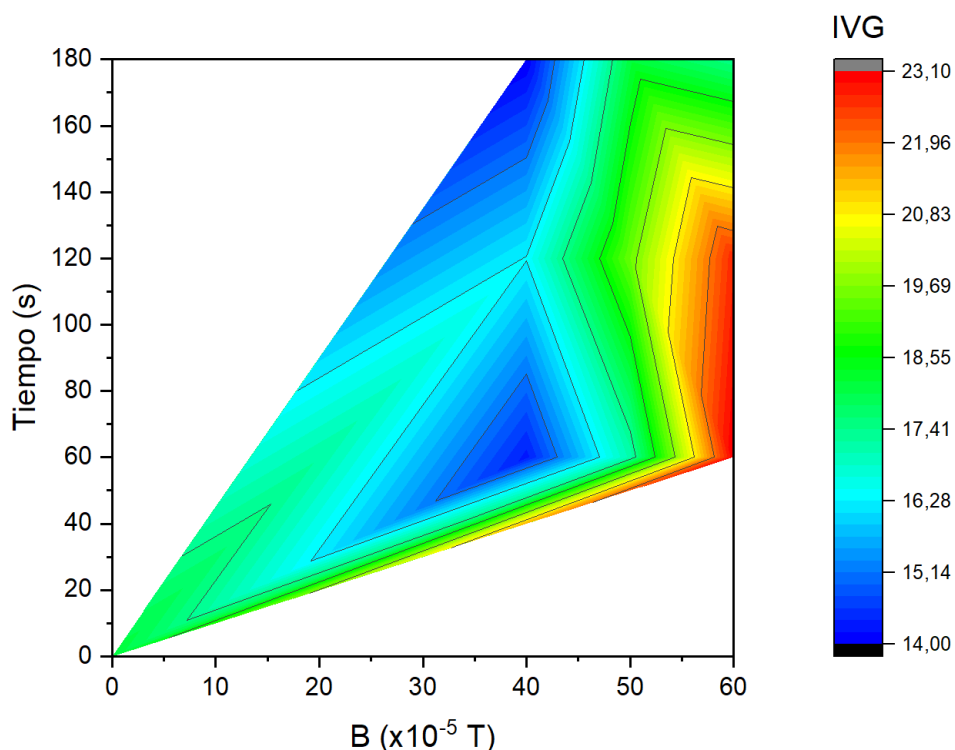


Gráfico 7. Mapa de calor para el índice de velocidad de germinación (IVG) vs. intensidad de campo y tiempo de exposición

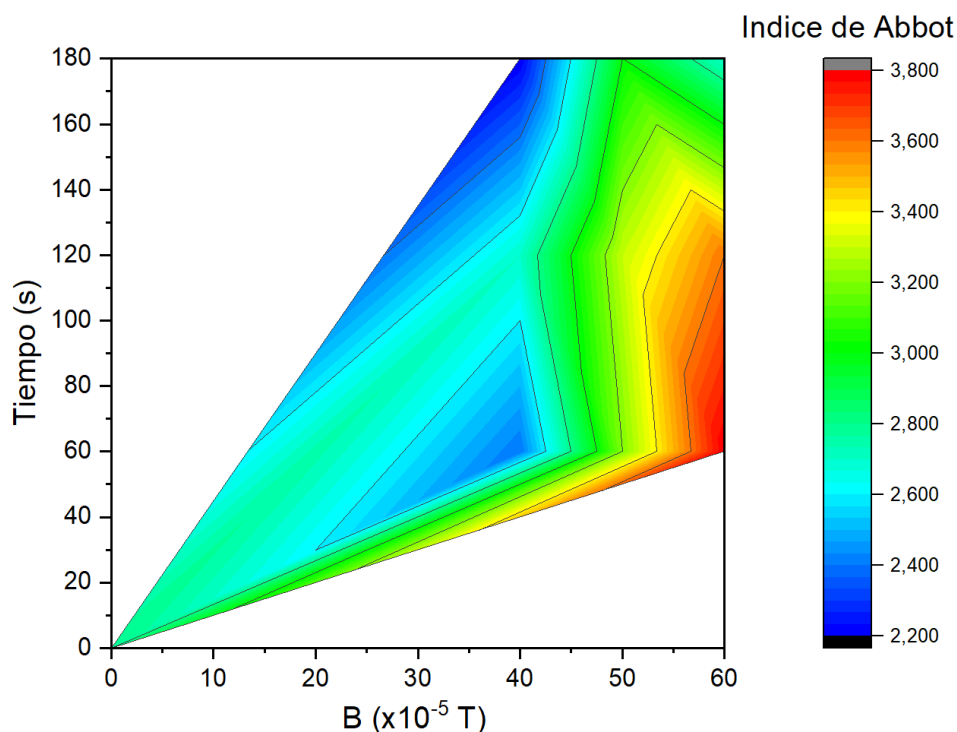


Gráfico 8. Mapa de calor para el índice de Abbot de germinación vs. intensidad de campo y tiempo de exposición

Conclusiones

La aplicación de campos magnéticos DC afecta el proceso de germinación de las semillas. Los protocolos adecuados de aplicación de campos magnéticos dependen de la relación de intensidad de campo y tiempo de exposición, que pueden mejorar significativamente el proceso germinativo, pero en condiciones no adecuadas pueden tener efectos inhibitorios o retardantes de la germinación, lo que concuerda con los reportes de De Souza et al. (2005).

La metodología Taguchi demuestra ser una herramienta valiosa en el diseño de experimentos que puede ser aplicable en los procesos de magneto estimulación para la producción agrícola. Los resultados experimentales permitieron corroborar los resultados mostrados por el modelo Taguchi.

El factor de correlación del modelo Taguchi sugiere que se requiere una mayor población muestral para tener más fiabilidad estadística del experimento, la cual podrá ser aceptable con valores sobre el 95 %.

Para la aplicación de campos magnéticos en procesos de germinación de cultivos intensivos es indispensable realizar estudios que permitan determinar las condiciones óptimas de aplicación de estos campos. Estos estudios deben ser acompañados de procesos estadísticos que optimicen la experimentación y que permitan una correlación adecuada de los resultados experimentales.

Los resultados mostraron que las mejores condiciones de exposición de semillas para incrementar tanto la velocidad de germinación como la longitud de raíz se dan para campos de 600 μ T con tiempo de exposición de 120 s. Asimismo, se determinó que campos de muy baja intensidad no mostraron efectos benéficos en el proceso experimental, también que los tiempos prolongados de exposición (180 s) pueden tener efectos inhibitorios. Estos resultados concuerdan con los reportes de Sarraf et al. (2020).

Agradecimientos

Se agradece al Grupo de Investigación Estratégica de Producción Sostenible de Agroalimentos (GIEAA), por la financiación del proyecto «Efecto de la aplicación de campos magnéticos en los procesos productivos de agroalimentos», que hizo posible este primer trabajo; al grupo de investigación Grupo de Agroecología, Sustentabilidad y Medio Ambiente (GASMA); a las unidades tecnológicas Agroambiental, Agroalimentos e Industrialización y Mantenimiento con Tecnologías Emergentes; al grupo de Ingeniería en Energías Renovables, por la consecución de equipos y sensores para el montaje experimental, y al Laboratorio de Innovación Abierta (LabA), que hizo el soporte de diseño y construcción del prototipo utilizado en este trabajo.

Referencias

- Awty-Carroll, D., Ravella, S., Clifton-Brown, J., Robson, P. (2020). Using a Taguchi DOE to investigate factors and interactions affecting germination in *Miscanthus sinensis*. *Scientific Reports*, 10:1602. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58322-x>
- De Souza, A., García, D., Sueiro, L., Licea, L., Porras, E. (2005). Pre-sowing magnetic treatment of tomato seeds: effects on the growth and yield of plants cultivated late in the season. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 3(1), 113-122. <https://doi.org/10.5424/sjar/2005031-131>
- Koukounaras, A., Boursianis, A., Kostas, S., Theopoulos, A., Bantis, F., Samaras, T. (2023). Pre-Sowing Static Magnetic Field Treatment of Vegetable Seeds and Its Effect on Germination and Young Seedlings Development. *Seeds*, 2(4), 394-405. <https://doi.org/10.3390/seeds2040030>
- Martínez, E., Carbonell, M., Flórez, M., Amaya, J. y Maqueda, R. (2009). Germination of tomato seeds (*Lycopersicon esculentum* L.) under magnetic field. *International Agrophysics*, 23(1), 45-49. <http://www.international-agrophysics.org/Germination-of-tomato-seeds-Lycopersicon-esculentum-L-under-magnetic-field,106414,0,2.html>
- Moon, J. y Chung, H. (2000). Acceleration of germination of tomato seed by applying AC electric and magnetic fields. *Journal of Electrostatics*, 48(2) 103-114. [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(99\)00054-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(99)00054-6)
- Organización Internacional de Normalización de Semillas (ISTA). (2016). Reglas internacionales para el análisis de semillas 2016. (versión 2016). *International Seed Testing Association*.
- Pal, G., Roy, S., Singh, N., Singh, P., Yerasu, S. R., Yadava, R. y Behera, T. (2023). A study on economic impact assessment of tomato var. Kashi Aman using

the economic surplus model. *Vegetable Science*, 50(1),46-51.
<https://doi.org/10.61180/vegsci.2023.v50.i1.06>

Sarraf, M., Kataria, S., Taimourya, H., Santos, L. O., Menegatti, R. D., Jain, M., Ihtisham, M., & Liu, S. (2020). Magnetic Field (MF) Applications in Plants: An Overview. *Plants*, 9(9), s. p.. <https://doi.org/10.3390/plants9091139>

Zúñiga, O., Jiménez, C., Benavides, J. y Torres González, C. (2016). Efecto de campos electromagnéticos sobre la actividad microbiana de un bio-fertilizante. *Revista de Ciencias*, 20(1), 27-40.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-19352016000100002&script=sci_abstract&tlng=en