

El tratamiento con selenio mejora la germinación y el crecimiento de las plántulas de maíz

Selenium treatment enhances the germination and growth of corn seedlings

Morales-Hernández, L.Y.¹, Márquez-Quiroz, C.², Aguilar-Sánchez, N.C.¹,
Alvarado-López, C.J.³, de la Cruz-Lázaro, E.², Morales-Morales, A.E.^{4*}

¹ División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Estatal Libre Villahermosa- Comalcalco Km 27 S/N, Ranchería Rivera Alta, Jalpa de Méndez, C.P. 86205, Tabasco, México.

² Maestría en Ciencias Agroalimentarias. División Académica de Ciencias Agropecuarias, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Teapa km 25 R/a La Huasteca 2a sección, C.P. 86280. Centro, Tabasco, México.

³ CONAHCYT-Tecnológico Nacional de México, Campus Conkal. Avenida Tecnológico s/n C.P. 97345, Conkal, Yucatán, México.

⁴ CONAHCYT-División Académica de Ciencias Agropecuarias, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Teapa km 25 R/a La Huasteca 2a sección, C.P. 86280. Centro, Tabasco, México.



Please cite this article as/Como citar este artículo: Morales-Hernández, L.Y., Márquez-Quiroz, C., Aguilar-Sánchez, N.C., Alvarado-López, C.J., de la Cruz-Lázaro, E., Morales-Morales, A.E. (2024). Selenium treatment enhances the germination and growth of corn seedlings. *Revista Bio Ciencias*, 11, e1618. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1618>

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: December 19th 2023.

Accepted/Aceptado: April 08th 2024.

Available on line/Publicado: April 25th 2024.

RESUMEN

El proceso de germinación y el desarrollo temprano de las plántulas son fases cruciales en el ciclo vital de las plantas, y una germinación óptima puede contribuir significativamente al rendimiento de los cultivos. El selenio (Se) es un micronutriente esencial para muchos organismos y desempeña un papel fundamental en la mejora de la germinación de las semillas y el crecimiento temprano de las plántulas. La imprimación de semillas es una alternativa prometedora a otras formas de tratamiento de semillas, con el potencial de mejorar la germinación de las semillas y la calidad de las plántulas. Este estudio investigó los efectos de la imprimación de semillas en la germinación y el desarrollo de plántulas de dos variedades de maíz nativo de México utilizando diferentes tratamientos con Se. Se probaron cinco concentraciones de Se (0, 25, 50, 75 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$). Los resultados mostraron que las concentraciones de Se de 50 y 75 $\mu\text{M L}^{-1}$ tuvieron un efecto notablemente positivo sobre varias variables de germinación y morfológicas, incluyendo el porcentaje de germinación, la tasa de germinación, el potencial de germinación y el coeficiente de velocidad de germinación. Sin embargo, la concentración de Se de 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ produjo sistemáticamente tasas de germinación más bajas, lo que indica un efecto adverso sobre el proceso de germinación y el desarrollo inicial de las plántulas.

PALABRAS CLAVE: Germinación, maíz criollo, pequeños agricultores, tratamiento con selenio, variables morfológicas.

*Corresponding Author:

Amelio Eli Morales-Morales. CONAHCYT-División Académica de Ciencias Agropecuarias, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Teapa km 25 R/a La Huasteca 2a sección, C.P. 86280. Centro, Tabasco, México.

Teléfono: (999) 576 2807. E-mail: aemm1403@gmail.com

ABSTRACT

The germination process and early seedling development are crucial phases in the plant life cycle, and optimal germination can contribute significantly to crop yields. Selenium (Se) is an essential micronutrient for many organisms and performs a critical role in improving seed germination and early seedling growth. Seed priming is a promising alternative to other forms of seed treatment, with the potential to improve seed germination and seedling quality. This study investigated the effects of seed priming on the germination and seedling development of two native corn varieties in Mexico using different Se treatments. Five Se concentrations (0, 25, 50, 75, and 100 $\mu\text{M L}^{-1}$) were tested. The results showed that the Se concentrations of 50 and 75 $\mu\text{M L}^{-1}$ had a notably positive effect on several germination and morphological variables, including germination percentage, germination rate, germination potential, and the germination velocity coefficient. However, the Se concentration of 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ consistently produced lower germination rates, indicating an adverse effect on the germination process and initial seedling development.

KEY WORDS: Germination, creole corn, small-scale farmers, selenium treatment, morphological variables.

Introducción

El maíz (*Zea mays*) ha sido el alimento básico más importante de México durante miles de años, y está profundamente arraigado en la cultura y las tradiciones del país (Eagles & Lothrop, 1994; Pierre *et al.*, 2021). Se cultiva en millones de hectáreas en todo el país como cultivo de grano, maíz forrajero y maíz palomero, lo que lo convierte en una importante fuente de ingresos, en especial para los pequeños agricultores (Nawaz *et al.*, 2021). En particular, el maíz criollo, es apreciado por su sabor, textura y aromas únicos, que lo diferencian de otros tipos de maíz, y por la calidad nutricional que aporta (Domínguez-Hernández *et al.*, 2022; Gaxiola-Cuevas *et al.*, 2017). Asimismo, las variedades criollas tienden a ser más resistentes a plagas y enfermedades que las variedades comerciales.

En México, el 76.5 % de los agricultores utilizan semillas de razas autóctonas para su cultivo (Diédhiou *et al.*, 2021) y existen más de 61 razas endémicas (Arias *et al.*, 2007). El maíz criollo tiene un importante potencial productivo debido a su gran capacidad de adaptación al medio. Sin embargo, una desventaja del maíz nativo es la pérdida de viabilidad de las semillas debido a un manejo postcosecha inadecuado durante su almacenamiento, cuando las semillas pueden estar expuestas a diversas condiciones ambientales (Odjo *et al.*, 2022). La germinación y el desarrollo de las plántulas son etapas críticas en el ciclo de vida de una planta. Por lo tanto,

es crucial garantizar la germinación y el desarrollo de plántulas de buena calidad, ya que esto promueve un mejor rendimiento del cultivo (Nciizah *et al.*, 2020).

El selenio (Se) es un micronutriente esencial para muchos organismos. Aunque el Se no es un elemento esencial para las plantas, se considera beneficioso en cantidades traza (Bano *et al.*, 2021). Tiene un impacto significativo en la germinación y el desarrollo de las plántulas en las primeras etapas de la ontogénesis y puede estimular el crecimiento de las plantas (Adhikary *et al.*, 2022). Además, el Se interviene en varios procesos fisiológicos y bioquímicos, como la defensa antioxidante, la fotosíntesis y la regulación osmótica. Aunque el Se es beneficioso en pequeñas cantidades, en exceso, puede ser tóxico para las plantas (Gupta & Gupta, 2016).

Estudios recientes han demostrado un creciente interés en comprender el impacto del Se en el crecimiento de las plántulas en diversos cultivos. León-Morales *et al.* (2019) investigaron diferentes concentraciones de Se (1.25, 2.5 y 5.0 μM) en plántulas de chile serrano (*Capsicum annuum*) y rábano (*Raphanus sativus*) y demostraron que los tratamientos con Se mejoraron la germinación del chile en comparación con el control. De manera similar, Hu *et al.* (2022) investigaron los efectos de concentraciones de selenito sódico (0, 30 y 60 $\mu\text{mol L}^{-1}$) en el crecimiento de plántulas de arroz durante 10 y 18 días. Mientras que el aumento de la concentración de Se produjo efectos positivos sobre las longitudes de brotes y raíces y la biomasa seca de las plántulas inicialmente, en el día 18, una concentración de 60 $\mu\text{mol L}^{-1}$ dio lugar a una reducción de la biomasa seca de las plántulas. En otro estudio, Nawaz *et al.* (2021) sumergieron semillas de maíz híbrido en 0.075 mM de Se durante 12 h y 24 h para evaluar los efectos sobre la germinación y el contenido de clorofila en las plántulas. Los resultados mostraron un aumento significativo del porcentaje de germinación (38.0 %) y de la velocidad de emergencia (42.0 %) en las semillas tratadas con Se durante 24 h en comparación con las tratadas con agua destilada durante el mismo periodo. Sin embargo, no se observaron diferencias significativas en el contenido de clorofila de las plántulas de maíz entre los distintos tratamientos con Se.

Es importante destacar que los efectos del Se sobre la germinación, el crecimiento y el desarrollo de las plantas están influidos por la concentración de Se y el tiempo de exposición, y que estos efectos pueden variar significativamente entre las distintas especies vegetales. Por lo tanto, es esencial que se lleven a cabo más investigaciones para determinar la dosis óptima de Se para las variedades autóctonas de maíz y para comprender plenamente los posibles beneficios para la germinación. Por lo anterior, la imprimación de semillas ha surgido como una alternativa interesante a otras formas de tratamiento de semillas, con el potencial de mejorar la germinación y la calidad de las plántulas. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar si el tratamiento de imprimación con Se tenía un efecto positivo sobre la germinación y el desarrollo de las plántulas en el maíz nativo.

Material y Métodos

Área de estudio

El trabajo experimental se realizó en las instalaciones de investigación de la División Académica de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. El sitio de estudio se geolocalizó a 17° 47' N, 92° 57' W y se situó a una altitud de 29 m sobre el nivel del mar.

Selección de semillas

Se evaluaron dos variedades criollas de maíz de la raza “Mejen” del estado de Tabasco: una variedad amarilla y una blanca. Las semillas fueron colectadas durante el periodo otoño-invierno de 2022 en la comunidad de Tamulté de las Sabanas, Centro, Tabasco (localizada a 18° 09' 30" N, 92° 47' 00" W y situada a una altitud de 10 m sobre el nivel del mar). Las semillas se almacenaron en botellas de plástico siguiendo las prácticas típicas de conservación de los productores locales. Cada lote de semillas utilizadas en el estudio se seleccionó manualmente siguiendo los criterios adoptados por los productores locales, que favorecían las semillas de mayor tamaño y uniformidad y las semillas sanas, sin malformaciones y con ausencia de daños físicos (Magdaleno-Hernández *et al.*, 2016).

Tratamientos de las semillas, germinación y condiciones de crecimiento

Las semillas se sembraron en bandejas de germinación tipo banca de 49 cavidades y tenían dimensiones de 37 x 37 cm y una altura de cono de 18 cm. Se utilizó suelo franco arcilloso, con una capacidad de retención de agua de 300 mL kg⁻¹ y un punto de marchitez permanente de 18.60 mL kg⁻¹. Las características químicas del suelo fueron las siguientes: pH = 5.36, conductividad eléctrica (CE) = 181 µS/cm, y materia orgánica = 5.11 %.

El diseño experimental fue completamente al azar con tres repeticiones en un arreglo factorial 2 x 5, comprendiendo dos variedades de maíz (amarillo y blanco) y cinco concentraciones de Se en forma de selenato de sodio grado reactivo (≥ 98,0 % Na₂SeO₄). Las cinco concentraciones de Se fueron las siguientes: 0 µM L⁻¹ (Se-0) (grupo de control), 25 µM L⁻¹ (Se-25), 50 µM L⁻¹ (Se-50), 75 µM L⁻¹ (Se-75) y 100 µM L⁻¹ (Se-100) (Tabla 1). Estas dosis se seleccionaron basándose en estudios previos de Nawaz *et al.* (2013).

Las semillas se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 5 % durante 10 minutos, se enjuagaron con agua destilada por cinco veces y posteriormente se secaron al aire durante 2 h antes de la imprimación con selenio. Se colocaron 100 g de semillas en 200 ml de cada tratamiento y en agua destilada para los controles. Las semillas se mantuvieron en imbibición por 12 horas, posteriormente se sumergieron en agua destilada durante 20 minutos y se enjuagaron cinco veces (Adhikary *et al.*, 2022) a continuación, se sembraron dos semillas por cada cavidad.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos con semillas impregnadas de selenio

Tratamientos	Variedades	Na ₂ SeO ₄ (μM L ⁻¹)
T1	Amarillo	0
T2	Amarillo	25
T3	Amarillo	50
T4	Amarillo	75
T5	Amarillo	100
T6	Blanco	0
T7	Blanco	25
T8	Blanco	50
T9	Blanco	75
T10	Blanco	100

Medición de los porcentajes de germinación

La medición de los índices de germinación se realizó mediante un recuento diario y finalizó siete días después de la siembra (DAS) cuando no se observó germinación. El porcentaje de germinación (%G), la tasa de germinación (GR), el tiempo medio de emergencia (MET), el coeficiente de velocidad (VC) y la germinación media diaria (MDG) se evaluaron de acuerdo con Kader (2005). El potencial de germinación (GP) (Sun *et al.*, 2021) y el índice de vigor de las plántulas (SVI) se determinaron según Abdul-Baki & Anderson (1973), mientras que el índice de prontitud (PI) y el índice de estrés germinativo (GSI) se calcularon mediante la fórmula descrita por Abdi *et al.* (2016).

$$\text{Ecuación 1. Porcentaje de germinación} = \frac{n}{N} * 100$$

donde n es el número total de semillas germinadas y N es el número total de semillas de la muestra.

$$\text{Ecuación 2. Tasa de germinación} = \frac{\sum ti * ni}{\text{Days to final germination}}$$

donde ni es el número de semillas recién germinadas y ti es el número de días transcurridos desde la siembra.

$$\text{Ecuación 3. Potencial de germinación} = \frac{a}{N} * 100$$

donde a es el número de semillas germinadas al cabo de tres días y N es el número total de semillas de la muestra.

Ecuación 4.

$$\text{Tiempo medio de emergencia} = \frac{\sum(\text{plantas emergidas en un día}) * (\text{días después de la siembra})}{\text{Total de plantas emergidas}}$$

$$\text{Ecuación 5. Coeficiente de velocidad} = \frac{\sum ni}{\sum(ni * ti)}$$

donde, ni es el número de semillas germinadas por día y ti es el número de días transcurridos desde la siembra.

$$\text{Ecuación 6. Germinación media diaria} = \frac{(\% \text{ germinación})}{(\text{Días a germinación final})}$$

$$\text{Ecuación 7. Índice de vigor de plántula} = \% \text{ germinación} * \text{Longitud plántula (raíz + tallo)}$$

$$\text{Equation 8. Índice de prontitud} = nd1(1.0) + nd2(0.75) + nd3(0.5) + (nd4(0.25))$$

donde, $nd1$, $nd2$, $nd3$, and $nd4$ el número de semillas germinadas al cuarto, quinto, sexto y séptimo día después de la siembra, respectivamente.

$$\text{Equation 9. Índice de estres germinativo} = \frac{(\text{PI semillas estresadas})}{(\text{PI semillas control}) * 100} * 100$$

Variables morfológicas y unidades SPAD

Las variables morfológicas se midieron a los 15 DAS. Se contó el número de raíces primarias y secundarias visibles (RN), longitud de la raíz (RL) se midió desde el cuello de la raíz hasta el ápice de la raíz, longitud del tallo (SL) se midió desde el cuello de la raíz hasta el ápice de la última hoja, y el peso fresco de la raíz (RFW) y el peso fresco del tallo (SFW) se midieron in situ utilizando una balanza eléctrica portátil. El índice de verdor de la hoja (SPAD) se midió utilizando un medidor de clorofila portátil SPAD-502 (Konica Minolta Inc., Japón).

Análisis de datos

Se utilizó la prueba de rangos múltiples de Duncan para analizar la varianza y comparar las medias de las variables a un nivel de probabilidad $\leq 0,05$. Además, se evaluaron las posibles correlaciones entre las variables de germinación y crecimiento. Los coeficientes de correlación de Pearson (r) se evaluaron estadísticamente mediante una prueba t . Estos análisis se realizaron utilizando Statgraphics Centurion XVI (StatPoint Technologies Inc., USA).

Resultados

Germinación en las dos variedades de maíz

Se investigó la germinación de las semillas de dos variedades de maíz impregnadas de selenio. La germinación comenzó al tercer día, obteniéndose la máxima germinación siete días después de la siembra de las dos variedades locales (Figura 1). Para la variedad de maíz blanco (Figura 1a), el mayor %G (92,86 %) se obtuvo con los tratamientos Se-25, Se-50 y Se-75, mientras que para la variedad de maíz amarillo (Figura 1b), el mayor %G (95,24 %) se produjo con el tratamiento Se-50, seguido del tratamiento Se-25 (8,71 %).

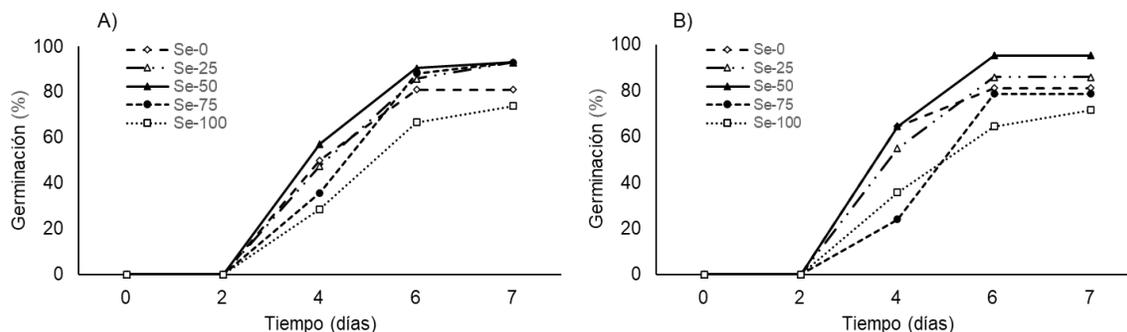


Figura 1. Porcentaje de germinación de semillas de dos variedades locales de maíz impregnadas de selenio. A). Maíz blanco, B). Maíz amarillo.

En relación con el %G por variedad, el maíz blanco mostró un valor ligeramente superior (86.67 %) que la variedad de maíz amarillo (82.38 %); sin embargo, no se observaron diferencias significativas (Tabla 2). La variedad de maíz amarillo presentó un GP sustancialmente mayor en comparación con la variedad de maíz blanco, produciendo un porcentaje de germinación del 35.80 %. La marcada diferencia subrayó las diferentes capacidades germinativas de las dos variedades de maíz en nuestras condiciones experimentales.

No hubo diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) en %G, GR, VC, MDG e PI entre las dos variedades (Tabla 2). Sin embargo, los resultados mostraron una diferencia significativa

en MET ($p \leq 0.05$). El maíz amarillo emergió más rápidamente, con una media de 3.97 días, mientras que el maíz blanco tardó una media de 4.51 días en emerger. El GP del maíz amarillo (23.81 %) fue superior a la del maíz blanco (37.14 %). La aplicación de Se a las semillas puede inducir la germinación, pero también puede causar estrés debido a la exposición a un elemento químico. El GSI de la variedad de maíz blanco (81.27 %) superó al de la variedad amarilla en un 36.8 %. Este índice demostró que las semillas de maíz blanco obtuvieron una germinación superior en condiciones de estrés, lo que indica que presentan una mayor resistencia en entornos de campo desafiantes. Este indicador es crucial en la selección de semillas de alta calidad para la agricultura, porque ayuda a identificar las variedades con mayor potencial de supervivencia y crecimiento en condiciones adversas.

Tabla 2. Índices de germinación en dos variedades de maíz impregnadas de selenio

Tratamientos	G (%)	GR	GP(%)	MET (días)	VC	MDG	PI	GSI (%)
Variedades de maíz								
Blanco	86.67 a	8.97 a	23.81 b	4.51 a	0.58 a	14.34 a	6.42 a	81.27 a
Amarillo	82.38 a	8.43 a	37.14 a	3.97 b	0.69 a	15.36 a	6.83 a	51.30 b
Dosis de selenio ($\mu\text{M L}^{-1}$)								
0	80.95 c	8.88 ab	27.38 ab	3.98 b	0.75 a	15.99 a	9.25 a	73.26 ab
25	89.29 ab	9.28 ab	29.76 ab	4.32 ab	0.65 a	15.49 a	7.79 ab	84.30 a
50	94.05 a	9.80 a	35.71 a	4.18 ab	0.73 a	16.89 a	6.33 bc	67.81 ab
75	85.71 bc	8.44 b	38.10 a	4.09 ab	0.61 a	14.75 a	4.88 c	53.24 b
100	72.62 d	7.10 c	21.43 b	4.62 a	0.42 b	11.12b	4.88 c	52.82 b
Interacción maíz x selenio								
Blanco-0	80.95 bc	8.86 bcd	7.14 d	4.36 ab	0.61 abc	14.37 bc	8.92 a	-
Blanco-25	92.86 a	10.08 ab	19.05 cd	4.65 a	0.65 ab	15.83 abc	7.67 ab	85.98 b
Blanco-50	92.86 a	8.78 bcd	42.86 a	4.33 ab	0.57 bc	14.74 bc	4.42 c	49.53 de
Blanco-75	92.86 a	9.41 abc	28.57 abc	4.59 a	0.57 bc	14.74 bc	6.08 bc	68.22 bcd
Blanco-100	73.81 c	7.63 de	21.43 bcd	4.64 a	0.48 bc	12.04 cd	5.00 c	56.07 cde
Amarillo-0	80.95 bc	8.90 bcd	47.62 a	3.61 b	0.89 a	17.62 ab	9.58 a	-
Amarillo-25	85.71 ab	8.48 cd	40.48 ab	4.00 ab	0.64ab	15.16 bc	7.92 ab	82.61 bc
Amarillo-50	95.24 a	10.73 a	28.57 abc	4.03 ab	0.89 a	19.05 a.	8.25 ab	86.09 b
Amarillo-75	78.57 bc	7.47 de	47.62 a	3.60 b	0.66 ab	14.76 bc	3.67 c	38.26 e
Amarillo-100	71.43 c	6.57 e	21.43 bcd	4.60 a	0.36 c	10.20 d	4.75 c	49.57 de

G= germinación; GR = tasa de germinación; GP = potencial de germinación; MET = tiempo medio de emergencia; VC = coeficiente de velocidad; MDG = germinación media diaria; PI = índice de prontitud; GSI = índice de estrés germinativo. Letras diferentes dentro de la misma columna indican una diferencia significativa entre tratamientos al nivel $p < 0.05$ con la prueba de Duncan.

Efectos de los niveles de selenio sobre la germinación del maíz

Se observaron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) en todas las variables analizadas en respuesta a las distintas concentraciones de Se. El tratamiento con Se-50 produjo el mayor %G (94.05 %), seguido del tratamiento con Se-25 (89.29 %). Por el contrario, una concentración de Se de $100 \mu\text{M L}^{-1}$ (Se-100) inhibió la germinación y produjo el menor %G, que fue inferior al tratamiento control (Se-0). Así, se demostró que las concentraciones más bajas de Se beneficiaron la germinación y superaron al tratamiento de control (Tabla 2).

En relación con el MET, el tratamiento control mostró una respuesta más rápida que los tratamientos con Se, con un tiempo de germinación de 3.98 días. En particular, el tratamiento Se-100 demostró un tiempo de emergencia de 4.62 días, lo que indica que la presencia de Se prolongó el tiempo necesario para que las semillas germinen. En cuanto al VC, los valores oscilaron entre 0.42 y 0.75. Las dosis de Se Se-0 (control) y Se-50 presentaron el mayor número de semillas germinadas por día, pero no mostraron diferencias significativas.

En términos de MDG, el tratamiento Se-100 obtuvo el menor número de semillas germinadas por día, mientras que el tratamiento Se-50 produjo el mayor número de semillas germinadas por día. Los valores de PI oscilaron entre 4.88 y 9.25, siendo el tratamiento control (Se-0) el que presentó el mayor valor, mientras que los tratamientos Se-75 y Se-100 obtuvieron los menores valores. En relación con el GSI, los tratamientos Se-0, Se-25 y Se-50 presentaron los mayores porcentajes con 73.26 %, 84.30 % y 67.87 %, respectivamente. Las dosis de Se Se-75 y Se-100 obtuvieron los valores de tensión más bajos.

Interacción del selenio con el maíz durante la germinación

Como se ha descrito anteriormente, el %G en las variedades de maíz blanco y amarillo fue del 92.86 % (Se-25, Se-50 y Se-75) y del 95.24 % (Se-50), respectivamente. Sin embargo, cuando se expusieron a la concentración máxima de Se ($100 \mu\text{M L}^{-1}$), el %G en las variedades de maíz blanco y amarillo se redujo a 73,81 % y 71,43 %, respectivamente. Esto indica que las concentraciones excesivas de Se afectaron negativamente a la germinación, independientemente de la variedad de maíz. Además, al evaluar el potencial de germinación, el estudio descubrió que los tratamientos Se-50 para el maíz blanco y Se-0 y Se-75 para el maíz amarillo produjeron los mejores resultados, con tasas de germinación del 42.86 %, 47.62 % y 47.62 %, respectivamente (Tabla 2). Estos resultados específicos pueden mejorar la GP del maíz, particularmente en la variedad de maíz amarillo.

Las semillas de maíz blanco y amarillo respondieron de forma diferente al tratamiento con Se con respecto a varios parámetros relacionados con la germinación. El MET para los tratamientos Se-0 y Se-75 de maíz amarillo fue de 3.61 y 3.60 días, respectivamente, mientras que los tratamientos Se-100 y Se-25 de maíz blanco produjeron los tiempos de emergencia más largos, de 4.64 y 4.65 días, respectivamente.

En relación con el VC, los tratamientos de maíz amarillo Se-0 y Se-50 produjeron el mayor valor (0.89), mientras que los tratamientos de maíz amarillo Se-100 y maíz blanco Se-100 produjeron los menores valores de 0.36 y 0.48, respectivamente. En términos de MDG, los tratamientos de maíz blanco Se-25 y maíz amarillo Se-0 y Se-50 obtuvieron el mayor número de semillas germinadas en un solo día, con 15.83, 17.62 y 19.05 semillas germinadas, respectivamente. Por el contrario, los tratamientos de maíz amarillo Se-100 y maíz blanco Se-100 produjeron el menor número de semillas germinadas en un día, con 10.20 y 12.04 semillas, respectivamente.

El GSI fue mayor en los tratamientos de maíz amarillo Se-25, maíz blanco Se-25 y maíz amarillo Se-50, con valores de 82.61 %, 85.98 % y 86.09 %, respectivamente, lo que indica un mayor nivel de tolerancia al Se. Por el contrario, los tratamientos de maíz amarillo Se-75 y Se-100 y el tratamiento de maíz blanco Se-50 presentaron la menor respuesta al Se. Con respecto al tratamiento de maíz amarillo Se-100, el estudio mostró que cuando esta variedad de maíz se expuso a una alta concentración de Se, la germinación se inhibió y se prolongó, lo que era indicativo del efecto estresante del Se en el proceso de germinación.

Variables de desarrollo de las plántulas de maíz y unidades SPAD

Efectos principales en las dos variedades de maíz

Las variables morfológicas de las plántulas son indicadores importantes para evaluar el desarrollo y rendimiento del cultivo, diagnosticar problemas de desarrollo, apoyar la toma de decisiones de manejo adecuadas y seleccionar las variedades más prometedoras. En ese sentido, se determinaron los efectos del remojo de semillas de maíz en tratamientos con Se sobre las variables de crecimiento de raíces y plántulas (Tabla 3).

Tabla 3. Variables morfológicas de plántulas de dos variedades locales de maíz

Tratamientos	RN	RL (cm)	RFW (mg)	SL (cm)	SFW (mg)	SVI	SPAD
Variedades de maíz							
Blanco	9.13b	23.99 a	1490.23 a	8.64 b	969.61 a	2820.33 a	37.29 a
Amarillo	9.93 a	24.42 a	1293.25 a	9.91 a	983.52 a	2825.14 a	32.63 b
Dosis de selenio ($\mu\text{M L}^{-1}$)							
0	8.00b	20.90 d	1499.78 ab	7.18c	831.43 b	2273.45 d	28.83d
25	9.67 a	25.52 b	1639.08 a	9.42 b	1186.77 a	3110.71 ab	36.58 b
50	10.17 a	23.85 c	1298.28 ab	9.48 b	1146.67 a	3136.90 a	39.05 a
75	10.33 a	23.33c	1393.08 ab	10.20 a	914.30 b	2865.24 bc	36.13 b
100	9.50 a	27.43 a	1128.45 b	10.10 ab	803.67 b	2727.38 c	34.20 c
Interacción maíz x selenio							
Blanco-0	6.33 b	19.17 g	1068.30 b	7.17 d	863.07 b	2131.67 e	29.83 f
Blanco-25	9.33 a	24.67 cd	2052.37 a	8.40 c	1110.90 a	3067.14 ab	36.90 c
Blanco-50	11.00 a	23.87 de	1581.87 ab	8.93 c	1142.20 a	3045.71 ab	39.30 b
Blanco-75	10.00 a	23.03 ef	1522.87 ab	9.37 bc	893.10 b	3008.57 ab	45.53 a
Blanco-100	9.00 a	29.23 a	1225.73 b	9.33 bc	838.80 b	2848.57 abc	34.90 de
Amarillo-0	9.67 a	22.63 f	1931.27 a	7.20 d	799.80 b	2415.24 de	27.83 g
Amarillo-25	10.00 a	26.37 b	1225.73 b	10.43 a	1262.63 a	3154.29 a	36.27 cd
Amarillo-50	9.33 a	23.83 de	1014.70 b	10.03 ab	1151.13 a	3228.10 a	38.80 b
Amarillo-75	10.67 a	23.63 def	1263.30 b	11.03 a	935.50 b	2721.90 bcd	26.76 g
Amarillo-100	10.00 a	25.63 bc	1031.17 b	10.87 a	768.53 b	2606.19 cd	33.50 e

RN = número de raíces; RL = longitud de la raíz; RFW = peso fresco de la raíz; SL = longitud del tallo; SFW = peso fresco del tallo; SVI = índice de vigor de la plántula. Letras diferentes dentro de la misma columna indican una diferencia significativa entre tratamientos al nivel $p < 0.05$ con la prueba de Duncan.

En relación con el RN en las dos variedades de maíz, se observó que la variedad de maíz amarillo tenía un número significativamente mayor de raíces que la variedad de maíz blanco con un promedio de 9.93 raíces por planta, aunque las raíces eran estadísticamente similares en tamaño. Además, las plántulas de maíz amarillo tenían una SL más larga 15 DAS, alcanzando una media de 9.91 cm, mientras que la variedad de maíz blanco registró una SL promedio de 8.64 cm. Para las demás variables medidas, que incluían RFW, SFW e SVI, no se encontraron diferencias estadísticas significativas.

Efecto del selenio en el crecimiento de las plántulas de maíz

En relación con los efectos del Se sobre el RN, se observaron variaciones entre 8.0 y 10.33, siendo el grupo control (Se-0) el que obtuvo el menor número de raíces, mientras que la dosis de Se Se-75 produjo el mayor número de raíces. En cuanto a la longitud radicular, el grupo control produjo la longitud radicular más corta (20.90 cm), mientras que el tratamiento Se-100 produjo la longitud más larga (27.43 cm). Sin embargo, en términos de RFW, el tratamiento Se-100 produjo raíces con el menor peso (1128.45 mg). En cuanto a SL, se observó una tendencia de crecimiento a medida que aumentaba la dosis de Se, siendo los tratamientos Se-75 y Se-100 los que produjeron el mayor crecimiento, con longitudes de tallo registradas de 10.20 cm, mientras que el grupo control (Se-0) obtuvo las plantas más pequeñas (7.18 cm). Este patrón también se observó en el SFW, donde el grupo control y el tratamiento Se-100 reportaron los menores pesos frescos (Tabla 3).

En relación con el SVI, los tratamientos Se-25 y Se-50 ocasionaron un mayor vigor en las plántulas, registrando valores de 3110.71 y 3136.90, respectivamente. Por tanto, aunque el selenio mejoró el crecimiento de la raíz y del tallo en las plántulas, también redujo el peso de la raíz y del tallo. En términos de unidades SPAD, el tratamiento Se-50 produjo las plantas más verdes, mientras que el grupo control (Se-0) obtuvo plantas con menor intensidad de verdor. De esta manera, estos resultados están directamente relacionados con la fotosíntesis de la planta.

Interacción del selenio con las variedades de maíz en el crecimiento de las plántulas

El selenio es un nutriente que puede ayudar al desarrollo de las plantas, y la forma en que interactúa con las diferentes variedades de maíz puede tener una influencia significativa en el crecimiento. Los resultados indicaron que la falta de Se (Se-0) afectó negativamente al desarrollo de las plántulas de maíz blanco, con raíces más pequeñas y menor peso fresco producido en comparación con otros tratamientos. Por el contrario, el tratamiento Se-100 produjo raíces más largas en las plántulas de maíz blanco, alcanzando los 29.23 cm. Además, la variedad de maíz amarillo tratada con dosis de 50 $\mu\text{M L}^{-1}$ (Se-50) produjo el mayor número de raíces (11.0), lo que indica una respuesta positiva a la presencia de Se. Además, en términos de peso fresco, Se-25 produjo el mayor peso de raíz (2052.37 mg) en la variedad de maíz blanco (Tabla 3). Estas variaciones en la respuesta entre las dos variedades de maíz pueden deberse a su capacidad para utilizar el Se en función de los niveles de concentración presentes.

Hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en todas las variables de crecimiento de las plántulas, variando la SL entre 7.17 cm y 11.03 cm. El tratamiento Se-0 para la variedad de maíz blanco produjo la SL más corto, mientras que el tratamiento Se-75 para la variedad de maíz amarillo obtuvo tallos más largos. En relación con el SFW, el tratamiento Se-100 del maíz amarillo presentó el menor peso, mientras que el tratamiento Se-25 del maíz amarillo registró el mayor peso del tallo. Al evaluar el SVI, se observó que los tratamientos de maíz amarillo Se-25 y Se-50 produjeron las mayores tasas de crecimiento, mientras que el tratamiento de maíz blanco Se-0 produjo el menor valor, lo que indica un efecto desfavorable sobre la vitalidad de las plántulas

en estas condiciones. En términos de unidades SPAD, destacó el tratamiento de maíz blanco Se-75, que produjo el mayor índice de verdor foliar con 45.53 unidades, lo que indica una mayor concentración de clorofila. Por el contrario, los tratamientos control (Se-0) en las variedades de maíz amarillo y blanco produjeron los valores más bajos de verdor foliar con 27.83 y 29.83 unidades, respectivamente.

Análisis de correlación

Las correlaciones de Pearson entre las variables de germinación y crecimiento de plántulas se presentan en la Figura 2. Se observaron correlaciones significativas ($p \leq 0,05$) y altamente positivas entre %G y las variables VC, GR, MDG, GSI, SFW, SVI y SPAD. Además, se encontraron diferencias y correlaciones significativas entre VC y GR, y entre VC con MDG y el PI. A su vez, GR mostró una correlación positiva con MDG, PI, SFW, SVI y SPAD, mientras que MDG se correlacionaron positivamente con PI. La variable GSI se correlacionó con las variables RL, SFW, SVI y SPAD. Sin embargo, SFW e SVI sólo se correlacionaron positivamente con SPAD.

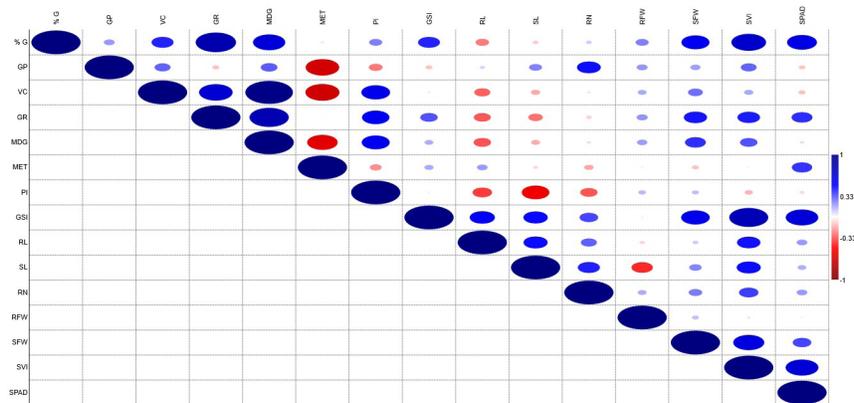


Figura 2. Correlación de Pearson.

El mayor tamaño y el color azul del círculo indican una correlación positiva, mientras que los círculos rojos indican correlaciones negativas entre las variables.

G= germinación; GP = potencial de germinación; VC = coeficiente de velocidad; GR = tasa de germinación; MDG = germinación media diaria; MET = tiempo medio de emergencia; PI = índice de prontitud; GSI = índice de estrés germinativo, RL = longitud de raíz; SL = longitud de tallo; RN = número de raíces; RFW = peso fresco de raíz; SFW = peso fresco de tallo; SVI = índice de vigor de plántula, SPAD, relacionado con dos variedades de maíz (blanco y amarillo) remojadas en selenio.

Por el contrario, se encontraron correlaciones negativas significativas ($p \leq 0.05$) entre variables, incluso entre GP y VC con MET. Además, MDG se correlacionó negativamente con MET y RL, mientras que PI mostró correlaciones negativas con RL, SL y RN. Por último, GSI y SL se correlacionaron con SFW.

Discusión

Efectos de las variedades de maíz sobre la germinación

Asegurar una germinación óptima es esencial en la agricultura, desempeñando un papel crucial en el logro de la uniformidad del cultivo y la maximización del rendimiento de la cosecha. Según Omar *et al.* (2022), cuando las semillas germinan a diferentes velocidades o muestran diferentes grados de vigor, pueden producirse disparidades en el tamaño y la madurez de las plantas, lo que complica la cosecha y reduce el rendimiento.

Según Aristizábal & Álvarez (2006), las semillas con un GR superior al 80 % pueden considerarse de alta germinación, mientras que las semillas con un índice entre el 60 % y el 80 % son de germinación media, y las semillas con un índice inferior al 60 % son de baja germinación. En este contexto, las dos variedades de maíz investigadas en este estudio se encuentran en la categoría de germinación alta. Por lo tanto, tener acceso a semillas de alta calidad, en términos de altos índices de germinación, es esencial para el rendimiento de los cultivos y la sostenibilidad agrícola (Elias *et al.*, 2012). Esto pone de relieve la importancia de las semillas de alta calidad para la seguridad alimentaria y el desarrollo sostenible.

En relación al VC nuestros resultados son similares a los reportados por Escobar-Álvarez *et al.* (2021), quienes obtuvieron valores de VC que van de 0.35 a 0.71 en cuatro variedades de maíz criollo de Guerrero, México. Con respecto al MET, los resultados de este estudio se alinean con los reportados por Mejía-Ramírez *et al.* (2019), quienes registraron la emergencia de cuatro variedades de maíz en un rango de 4 a 5 DAS. Así mismo, Laynez-Garsaball *et al.* (2007) reportaron MET de 3.9 y 4.2 días para dos variedades mejoradas de maíz. El tiempo medio de emergencia es una medida crucial en agricultura, ya que las variedades con un mayor porcentaje de emergencia en un plazo más corto son más favorables (Imran *et al.*, 2013). La pronta emergencia de las plántulas promueve un mejor desarrollo aéreo y radicular, favoreciendo el establecimiento del cultivo. Además, proporciona información valiosa sobre el vigor y la uniformidad de la germinación de las semillas, lo que puede influir significativamente en el establecimiento del cultivo y el rendimiento.

El GSI es un factor crucial en la selección de semillas de alta calidad. Permite identificar variedades con mayor potencial de supervivencia y crecimiento en ambientes adversos, como aquellas con mayor resistencia a la salinidad, sequía o condiciones edafoclimáticas (Hernández-Avera *et al.*, 2015). En este estudio se evaluaron las capacidades germinativas de dos variedades nativas de maíz, observándose una respuesta favorable. Espinosa-Paz *et al.* (2017) realizaron un estudio en zonas con estrés por sequía en México y encontraron que las variedades de maíz criollo, incluyendo Olotillo, Azul, Amarillo, Tuxpeño, Jarocho y Rocamex, mostraron mayor tolerancia al estrés durante la germinación. Estas variedades son importantes por su capacidad para sobrevivir y producir en suelos con escasa materia orgánica, nitrógeno y otros nutrientes. El cultivo de variedades locales tolerantes al estrés puede contribuir significativamente a la seguridad alimentaria en regiones propensas a condiciones climáticas adversas. Además, estas variedades locales pueden desempeñar un papel clave en los programas de mejoramiento

genético destinados a desarrollar cultivos más resistentes a la sequía y a otros tipos de estrés ambiental.

Efectos de la dosis de selenio en la germinación del maíz

La mejora en la germinación de las semillas observada en podría atribuirse a la capacidad del Se para aumentar la absorción de agua y potenciar la actividad de las enzimas implicadas en el proceso de germinación. Varios autores han obtenido resultados similares, Al-Omairi y Al-Hilfy (2021), si bien mostraron que dos dosis de Se aplicadas a dos variedades de maíz producían porcentajes de germinación comparables, la dosis mayor de Se (5 mg L^{-1}) dio lugar a porcentajes de germinación ligeramente inferiores en ambas variedades de maíz (aunque fue mayor que la del grupo de control). En el presente estudio, las altas concentraciones de Se ($100 \text{ }\mu\text{M L}^{-1}$) limitaron la germinación en las dos variedades de maíz, lo que posiblemente estuvo relacionado con una disminución de la actividad enzimática responsable de la hidrólisis de metabolitos esenciales para el desarrollo embrionario (Khaliq *et al.*, 2015). Por otra parte, León-Morales *et al.* (2019) realizaron un estudio sobre la germinación del chile (*Capsicum annuum* L.) utilizando selenito y selenato de sodio. Encontraron que concentraciones de 1.25, 2.5 y $5.0 \text{ }\mu\text{M L}^{-1}$ de ambos compuestos de Se promovieron mayores tasas de germinación que en el grupo control. Por el contrario, Ahmed (2010) descubrió que la germinación de las semillas de lechuga, tomate y rábano disminuía a medida que aumentaba la concentración de Se (0 a 200 ppm Na_2SeO_4). Estos resultados son consistentes con el presente estudio, donde se observó que concentraciones de Se de $100 \text{ }\mu\text{M L}^{-1}$ inhibieron la germinación en las dos variedades de maíz.

El MET obtenido en este estudio fue similar al reportado por Hu *et al.* (2022), quienes demostraron una germinación acelerada de las semillas y un aumento de las tasas de emergencia en semillas de arroz mediante el cebado con dosis de Se de 0, 30 y $60 \text{ }\mu\text{M L}^{-1}$. De la misma manera, Khaliq *et al.* (2015) informaron de una disminución de la MET en dos cultivares de arroz cuando se expusieron a concentraciones de $45 \text{ }\mu\text{M L}^{-1}$ y $60 \text{ }\mu\text{M L}^{-1}$ de selenito de sodio.

En cuanto al PI y el GSI, la investigación ha demostrado que el pretratamiento con Se modula los índices fisiológicos y la maquinaria antioxidante, mejorando la tolerancia al estrés por sequía en maíz (Nawaz *et al.*, 2021). Además, se ha demostrado la eficacia de la imprimación de semillas con Se durante la germinación en arroz bajo estrés por arsénico, con la adición de Se reduciendo significativamente el contenido de arsénico en el grano (Moulick *et al.*, 2016). Por tanto, los mecanismos básicos que subyacen a los efectos beneficiosos del Se en las plantas están asociados a la capacidad de este elemento para modular la maquinaria antioxidante, aumentando consecuentemente la tolerancia de la planta al estrés inducido por factores abióticos (Hawrylak-Nowak *et al.*, 2018).

Variables morfológicas de las plántulas de las dos variedades de maíz

Las variables relacionadas con el desarrollo de raíces y plántulas proporcionan información importante sobre el crecimiento y la salud de las plántulas de maíz, lo cual es crucial para evaluar su adaptabilidad y rendimiento en diferentes condiciones. Los estudios han demostrado que el

peso fresco del tallo y la radícula, así como la relación entre la altura de la plántula y la longitud de la raíz, son indicadores importantes del desarrollo de las plántulas de maíz (Layne-Garsaball *et al.*, 2007).

El presente estudio mostró valores de SL ligeramente superiores a los reportados por Bolívar *et al.* (2007), quienes reportaron una SL promedio de 10.41 cm, ocho días después de la siembra en campo abierto, en nueve variedades de maíz en Venezuela. De manera similar, Pérez-Mendoza *et al.* (2020) obtuvieron SL similares para dos variedades híbridas de maíz, H-80E (9.35 cm) y HV-65 (9.05 cm), las cuales fueron superiores al híbrido H-159E (6.23 cm). En términos de RL, los resultados del presente estudio fueron ligeramente mayores (24.20 cm) que los reportados por Pérez-Mendoza *et al.* (2020), quienes obtuvieron un promedio de 20.28 cm. Estas diferencias en el desarrollo de las plántulas pueden atribuirse a los procesos bioquímicos y reacciones enzimáticas que tienen lugar durante el proceso de germinación, lo que se refleja en el crecimiento y uniformidad de las plántulas (Ruiz-Torres *et al.*, 2012).

El SVI de las dos variedades de maíz investigadas en este estudio fue de 2820.33 y 2825.00 para el maíz blanco y el maíz amarillo, respectivamente. Esto fue superior a los índices reportados por Pérez-Mendoza *et al.* (2020), que oscilaron entre 1342.2 y 2265.1. El SVI es un parámetro importante para estimar la calidad de la semilla, que luego se refleja en la calidad de las plántulas (Rodríguez *et al.*, 2008).

Las unidades SPAD proporcionan valores que indican la intensidad del color verde en una hoja y corresponden a sus concentraciones de clorofila (Brewer *et al.*, 2022). Una comparación de las unidades SPAD mostró que la variedad de maíz blanco tenía una mayor intensidad de color verde que la variedad de maíz amarillo. Este hallazgo indicó que la variedad de maíz blanco tenía un mayor contenido de clorofila o una mejor eficiencia fotosintética (Martínez & Guiamet, 2004). Sin embargo, es importante tener en cuenta la posible influencia de los factores ambientales en las lecturas de SPAD a la hora de interpretar estos resultados.

Efecto de la dosis de selenio en el crecimiento de las plántulas de maíz

En cuanto al efecto de la dosis de Se sobre el crecimiento de las plántulas de maíz, los resultados del presente estudio concuerdan con varios estudios anteriores. Por ejemplo, Lin-Xuan *et al.* (2023) observaron un incremento en RN y RL a dosis medias de Se (15 y 30 mg L⁻¹) en plantas de *Sophora tonkinensis*. Del mismo modo, León-Morales *et al.* (2019) observaron un aumento significativo de la longitud de la raíz de chile en tratamientos con Se, registrando casi el doble de crecimiento en comparación con las plantas control. Además, los resultados de Hu *et al.* (2022) apoyan este patrón, reportando un incremento en la longitud y peso seco de brotes y raíces de arroz tratado con diferentes dosis de Se. Otros estudios han indicado que la estimulación del crecimiento de las raíces podría estar asociada con la activación de la respiración celular y el ciclo de nutrientes durante el tratamiento inicial de las semillas (Vázquez-Ramos & de la Paz-Sánchez, 2003), lo que confirma el papel crucial del Se en la producción y crecimiento de las raíces. La interacción entre las concentraciones de Se y las diferentes variedades de maíz puede tener un impacto significativo en el número de raíces de la planta. Sin embargo, la comprensión de los

factores que regulan la acumulación y distribución de Se en plantas de cultivo es crucial para mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas (Pinzon-Núñez *et al.*, 2023). Los resultados del presente estudio sobre el crecimiento del tallo fueron consistentes con los de Nawaz *et al.* (2013). A concentraciones más altas de Se ($100 \mu\text{M L}^{-1}$), no se observó ningún impacto en el crecimiento de las plántulas; como tal, el Se mejoró las relaciones planta-agua reduciendo el potencial osmótico de las plántulas que crecían bajo estrés.

Aunque el Se mejoró el crecimiento de la raíz y del tallo de las plántulas, también se observó una reducción del peso de la raíz y del tallo. Esto coincide con la noción presentada por Nishiuchi *et al.* (2012), quienes propusieron que el alargamiento de los brotes podría consumir más nutrientes del endospermo, reduciendo así el peso de las plántulas. Además, se sabe que las mejoras en el crecimiento y desarrollo de las plántulas tratadas con micronutrientes permiten una mayor accesibilidad a estos minerales en las semillas. Estos minerales son esenciales para la síntesis de proteínas y enzimas que son responsables de la utilización eficiente de otros nutrientes del suelo en las plántulas, lo que en consecuencia mejora la germinación de las semillas y el establecimiento de las plántulas (Nciizah *et al.*, 2020).

Por lo tanto, se puede inferir que el remojo de semillas de maíz en Se puede tener un impacto selectivo sobre ciertos aspectos morfológicos de las plántulas, destacando la importancia de considerar no sólo las variaciones intraespecíficas, sino también las condiciones específicas de manejo y las interacciones genéticas. Estudios previos han demostrado que la adición de Se (en forma de selenito sódico) a semillas de pimiento serrano y rábano aumentó la altura, número y longitud de las raíces y el peso seco de las plántulas (León-Morales *et al.*, 2019). Esto puede deberse, en parte, al papel del Se en la mejora de la fotosíntesis, la absorción de nutrientes y la defensa antioxidante.

Finalmente, en términos de unidades SPAD, la dosis de $50 \mu\text{M L}^{-1}$ de Se produjo las plantas más verdes, mientras que el grupo control ($0 \mu\text{M L}^{-1}$) produjo plantas con la menor intensidad de verdor. Por tanto, estos resultados están directamente relacionados con la fotosíntesis de las plantas y pueden deberse a que el Se contribuye a mejorar las funciones celulares y, por tanto, el crecimiento y el desarrollo de las plantas (Hasanuzzaman *et al.*, 2021). Así mismo, Adhikary *et al.* (2022) utilizaron tratamientos con nanopartículas de Se y zinc en semillas de arroz y demostraron que los tratamientos con Se pueden ayudar a mejorar el contenido de clorofila en las plántulas de arroz.

Conclusiones

Este estudio demostró que las semillas de maíz tratadas con Se tuvieron mayores tasas de germinación y crecimiento de plántulas en comparación con las semillas no tratadas (control). Los efectos del Se sobre las semillas de maíz se observaron principalmente utilizando concentraciones de Se de $50 \mu\text{M L}^{-1}$ y $75 \mu\text{M L}^{-1}$ e incluyeron efectos positivos sobre varias variables, incluyendo %G, GR, GP y el VC. Por el contrario, la concentración de Se de $100 \mu\text{M L}^{-1}$ mostró resultados sistemáticamente inferiores para la mayoría de las variables, lo que

indica un efecto adverso. En conjunto, estos resultados indican que el Se puede tener un efecto beneficioso sobre la germinación de las semillas y otros índices fisiológicos en plántulas de maíz. Sin embargo, la concentración óptima de Se para el crecimiento y desarrollo del maíz puede depender de una serie de factores, incluyendo la variedad de la planta, el tipo de suelo y otras condiciones ambientales.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo: autor 1, autor 6; desarrollo de la metodología: autor 1, autor 6; manejo de software, autor 1, autor 2; validación experimental: autor 1, autor 2.; análisis de resultados, autor 1, autor 2, autor 3; Manejo de datos, autor 1, autor 6; escritura y preparación del manuscrito, autor 1, autor 3, autor 6; redacción, revisión y edición: autor 1, autor 4, autor 5; administrador de proyectos: autor 2, autor 6.; adquisición de fondos: autor 6.

Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo: LYMH, CMQ, NCAS, CJAL, ECL y AEMM.

Financiamiento

Esta investigación es parte del proyecto de Estancias Posdoctorales por México 2022 (3): "Potencial para mejorar la calidad agronómica y nutrimental en maíces nativos de Tabasco a través de la biofortificación con selenio".

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- Abdi, N., Wasti, S., Salem, M.B., El Faleh, M., & Mallek-Maalej, E. (2016). Study on germination of seven barley cultivars (*Hordeum vulgare* L.) under salt stress. *Journal of Agricultural Science*, 8(8), 88-97.
- Abdul-Bak, A.A., & Anderson, J.D. (1973). Vigor determination in soybean seed by multiple criteria. *Crop Science*, 13(6), 630-633. <https://doi.org/10.2135/cropsci1973.0011183x001300060013x>.
- Adhikary, S., Biswas, B., Chakraborty, D., Timsina, J., Pal, S., Chandra-Tarafdar, J., Banerjee, S., Hossain, A., & Roy S. (2022). Seed priming with selenium and zinc nanoparticles modifies germination, growth, and yield of direct-seeded rice (*Oryza sativa* L.). *Scientific reports*, 12, 7103. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11307-4>.
- Ahmed, H. (2010). Differences between some plants in selenium accumulation from supplementation soils with selenium. *Agriculture and Biology Journal of North America*, 1(5),

- 1050-1056. <https://doi.org/10.5251/abjna.2010.1.5.1050.1056>.
- Al-Omairi, A.A., & Al-Hilfy, I.H. (2021). Effect of soaking maize seeds with selenium and chitosan on improving germination, vigour and viability of seed and seedling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 904(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/904/1/012075>.
- Arias, L., Latournerie, L., Montiel, S., & Sauri, E. (2007). Cambios recientes en la diversidad de maíces criollos de Yucatán, México. *Universidad y Ciencia*, 23(1), 69-74.
- Aristizábal, L., & Álvarez, L.J.A. (2006). Los efectos del nivel de vigor de la semilla pueden persistir e influenciar el crecimiento de la planta, la uniformidad de la plantación y la productividad. *Agronomía* 14(1):17-24.
- Bano, I., Skalickova, S., Sajjad, H., Skladanka, J., & Horky, P. (2021). Uses of selenium nanoparticles in the plant production. *Agronomy*, 11, 2229. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112229>.
- Bolívar, C.E., Méndez-Natera, R., & Otahola-Gómez, V.A. (2007). Germinación y el crecimiento de plántulas de maíz en laboratorio, invernadero y campo. *Revista de Agricultura Tropical*, 36, 23-33.
- Brewer, K., Clulow, A., Sibanda, M., Gokool, S., Naiken, V., & Mabhaudhi, T. (2022). Predicting the chlorophyll content of maize over phenotyping as a proxy for crop health in smallholder farming systems. *Remote Sensing*, 14 (3), 518. <https://doi.org/10.3390/rs14030518>.
- Diédhiou, I., Ramirez-Tobias, H.M., Fortanelli-Martinez, J., & Flores-Ramírez, R. (2021). Effects of different temperatures and water stress on germination and initial growth of creole genotypes of maize from three different agroclimatic regions of San Luis Potosí (Mexico). *Maydica*, 66, 16.
- Domínguez-Hernández, E., Gaytán-Martínez, M., Gutiérrez-Urbe, J.A., & Domínguez-Hernández, M.E. (2022). The nutraceutical value of maize (*Zea mays* L.) landraces and the determinants of its variability: A review. *Journal of Cereal Science*, 103, 103399. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103399>.
- Eagles, H.A., & Lothrop, J.E. (1994). Highland maize from central Mexico-its origin, characteristics, and use in breeding programs. *Crop Science*, 34, 11-19.
- Elias, S.G., Copeland, L.O., McDonald, M.B. & Baalbaki, R.Z. (2012). Seed Testing: Principles and Practices. Michigan State University Press, East Lansing, MI.
- Escobar-Álvarez, J.L., Ramírez-Reynoso, O., Cisneros-Saguilán, P.C., Gutiérrez-Dorado, R., Maldonado-Peralta, M.A., & Valenzuela-Lagarda, J.L. (2021). Viability and germination in native corn seeds from the state of Guerrero. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 8(II): e2963. <https://doi.org/10.19136/era.a8nII.2963>.
- Espinosa-Paz, N. Martínez-Sánchez, J., Ariza-Flores, R., Cadena-Iñiguez, P., Hernández-Maldonado, M., & Ramírez-Córdova, A.L. (2017). Germinación de semillas de variedades criollas de maíz (*Zea mays* L.) bajo déficit hídrico. *Agro Productividad*, 10(9):41-47.
- Gaxiola-Cuevas, N., Mora-Rochin, S., Cuevas-Rodriguez, E.O., Leon-Lopez, L., Reyes-Moreno, C., Montoya-Rodriguez, A., & Milan-Carrillo, J. (2017). Phenolic acids profiles and cellular antioxidant activity in tortillas produced from mexican maize landrace processed by nixtamalization and lime extrusion cooking. *Plant Foods Human Nutrition*, 72(3), 314-320. <https://doi.org/10.1007/s11130-017-0624-3>.
- Gupta, M., & Gupta, S. (2016). An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Frontier in Plant Science*, 7, 2074. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>

- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Garcia-Caparros, P., Parvin, K., Zulfiqar, F., Ahmed, N., & Fujita, M. (2021). Selenium Supplementation and crop plant tolerance to metal/metalloid toxicity. *Frontier in Plant Science* 12, 792770. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.792770>.
- Hawrylak-Nowak, B., Hasanuzzaman, M., & Matraszek-Gawron, R. (2018). Mechanisms of selenium-induced enhancement of abiotic stress tolerance in plants. In: Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Oku, H., Nahar, K., Hawrylak-Nowak, B. (eds) *Plant Nutrients and Abiotic Stress Tolerance*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-9044-8_12.
- Hernández-Avera, Y., Soto-Pérez, N., Florido-Bacallao, M., Delgado-Abad, C., Ortiz-Pérez, R., & Enríquez-Obregón, G. (2015). Evaluation of salinity tolerance under controlled conditions of nine Cuban soybean cultivars (*Glycine max* (L.) Merrill). *Cultivos Tropicales*, 36(4), 120-125.
- Hu, F.Q., Jiang, S.C., Wang, Z., Hu, K., Xie, Y.M., Zhou, L., Zhu, J.Q., Xing, D.Y., & Du, B. (2022). Seed priming with selenium: Effects on germination, seedling growth, biochemical attributes, and grain yield in rice growing under flooding conditions. *Plant Direct*, 6(1), e378. <https://doi.org/10.1002/pld3.378>.
- Imran, M., Mahmood, A., Römheld, V., & Neumann, G. (2013). Nutrient seed priming improves seedling development of maize exposed to low root zone temperatures during early growth. *European Journal of Agronomy*, 49,141-148. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2013.04.00>.
- Kader, M. (2005). A comparison of seed germination calculation formulae and the associated interpretation of resulting data. *Journal & Proceedings of the Royal Society of New South Wales*, 138, 65-75.
- Khalid, A., Aslam, F., Matloob, A., Hussain, S., Geng, M., Wahid, A. & Rehman, H. (2015). Seed Priming with selenium: consequences for emergence, seedling growth, and biochemical attributes of rice. *Biological Trace Element Research*, 166, 236-244. <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0260-4>.
- Layne-Garsaball, J.A., Méndez-Natera, J.R., & Mayz-Figueroa, J. (2007). Crecimiento de plántulas a partir de tres tamaños de semilla de dos cultivares de maíz (*Zea mays* L.), sembrados en arena y regados con tres soluciones osmóticas de sacarosa. *Idesia (Arica)*, 25(1), 21-36.
- León-Morales, J., Panamá-Raymundo, W., Langarica-Velázquez, E., & García-Morales, S. (2019). Selenium and vanadium on seed germination and seedling growth in pepper (*Capsicum annuum* L.) and radish (*Raphanus sativus* L.). *Revista Bio Ciencias*, 6, e425. <https://doi.org/10.15741/revbio.06.e425>
- Lin-Xuan, L., Zhu, Q., Jin-Yuan, C., Ying, L., Yang, L., Gui-Li, W., Xiao-Li, H., Jian-Hua, M., & Kun-Hua, W. (2023). Effects of selenium on growth and biochemical characteristics of tissue culture seedlings of *Sophora tonkinensis*. *Pharmacognosy Magazine*, 19 (3), 772-781. <https://doi.org/10.1177/09731296231169614>.
- Magdaleno-Hernández, E., Mejía-Contreras, A., Martínez-Saldaña, T., Jiménez-Velazquez, M. A., Sanchez-Escudero, J., & García-Cué, J.L. (2016). Selección tradicional de maíz criollo. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 13(3), 437-447.
- Martínez, D.E., & Guamet, J.J. (2004). Distortion of the SPAD 502 chlorophyll meter readings by changes in irradiance and leaf water status. *Agronomie*, 24, 41-46.
- Mejía-Ramírez, F., Castelán-Estrada, M., Lagunes-Espinoza, L.C., Obrador-Olán, J.J., & Lara-Viveros, F.M. (2019). Osmocondicionamiento de maíces criollos: efectos sobre la fenología y crecimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(8), 1721-1732. <https://doi.org/10.1016/j.rmcia.2019.08.001>

- [org/10.29312/remexca.v10i8.1159](https://doi.org/10.29312/remexca.v10i8.1159).
- Moullick, D., Ghosh, D., & Chandra-Santra, S. (2016). Evaluation of effectiveness of seed priming with selenium in rice during germination under arsenic stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 109, 571-578. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.11.004>.
- Nawaz, F., Ashraf, M.Y., Ahmad, R., & Waraich, E.A. (2013). Selenium (Se) seed priming induced growth and biochemical changes in wheat under water deficit conditions. *Biological Trace Element Research*, 151(2), 284-293. <https://doi.org/10.1007/s12011-012-9556-9>.
- Nawaz, F., Zulfiqar, B., Ahmad, K.S., Majeed, S., Shehzad, M.A., Javeed, H.M.R., Tahir, M.N., & Ahsan, M. (2021). Pretreatment with selenium and zinc modulates physiological indices and antioxidant machinery to improve drought tolerance in maize (*Zea mays* L.). *South African Journal of Botany*, 138, 209-216. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.12.016>.
- Nciizah, A.D., Rapetsoa, M.C., Wakindiki, I.I., & Zerizghy, M.G. (2020). Micronutrient seed priming improves maize (*Zea mays*) early seedling growth in a micronutrient deficient soil. *Heliyon*, 6(8), e04766. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04766>.
- Nishiuchi, S., Yamauchi, T., Takahashi, H., Kotula, L., & Nakazono, M. (2012). Mechanisms for coping with submergence and waterlogging in rice. *Rice*, 5, 2. <https://doi.org/10.1186/1939-8433-5-2>.
- Odjo, S., Bongianino, N., Gonzalez-Regalado, J., Cabrera-Soto, M.L., Palacios-Rojas, N., Burgueno, J., & Verhulst, N. (2022). Effect of storage technologies on postharvest insect pest control and seed germination in Mexican maize landraces. *Insects*, 13(10), 878. <https://doi.org/10.3390/insects13100878>.
- Omar, S., Tarnawa, Á., Kende, Z., Ghani, R.A., Kassai, M.K., & Jolánkai, M. (2022). Germination characteristics of different maize inbred hybrids and their parental lines. *Cereal Research Communications*, 50(4), 1229-1236. <https://doi.org/10.1007/s42976-022-00250-9>.
- Pérez-Mendoza, C., Tovar-Gómez, M. R., Arellano-Vázquez, J.L., & Velásquez-Cárdelas, G. A. (2020). Atributos físicos y fisiológicos en semillas de maíz y su relación con caracteres de vigor. *Revista Mexicana de Agroecosistemas*, 8(1), 11-13.
- Pierre, J.F., Latournerie-Moreno, L., Garruña-Hernández, R., Jacobsen, K.L., Laboski, C.A. M., Salazar-Barrientos, L.L., & Ruiz-Sánchez, E. (2021). Farmer perceptions of adopting novel legumes in traditional maize-based farming systems in the Yucatan Peninsula. *Sustainability*, 13(20), 11503. <https://doi.org/10.3390/su132011503>.
- Pinzon-Núñez, D.A., Wiche, O., Bao, Z., Xie, S., Fan, B., Zhang, W., Tang, M., & Tian, H. (2023). Selenium species and fractions in the rock-soil-plant interface of maize (*Zea mays* L.) grown in a natural ultra-rich Se environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4032. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054032>.
- Rodríguez, I., Adam, G., & Durán, J.M. (2008). Ensayos de germinación y análisis de viabilidad y vigor en semillas. *Agricultura: Revista Agropecuaria*, 78(912), 836-842.
- Ruíz-Torres, N.A., Rincón-Sánchez, F., Bautista-Morales, V.M., Martínez-Reyna, J. M., Burciaga-Dávila, H.C., & Olvera-Esquivel, M. 2012. Calidad fisiológica de semilla en dos poblaciones de maíz criollo mejorado. *Agraria* 9(2), 43-48.
- Sun, Y., Xu, J., Miao, X., Lin, X., Liu, W., Ren, H. (2021). Effects of exogenous silicone on maize seed germination and seedling growth. *Scientific Reports*, 11, 1014. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79723-y>.
- Vázquez-Ramos, J.M., & de la Paz-Sánchez, J. (2003). The cell cycle and seed germination. *Seed Science Research*, 13 (2): 113-130. <https://doi.org/10.1079/SSR2003130>.