Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4213

Estimulación de emergencia y crecimiento inicial de *Agave salmiana* mediante nanopartículas metálicas

Yessica Abigail Alvarado-Cepeda [1]
Jorge Luis Vega-Chávez [1, §]
Erica Muñiz-Reyes [2]
Fabiola Garrido-Cruz [3]

1 Tecnológico Nacional de México-Campus Huichapan. Domicilio Conocido S/N, Colonia El Saucillo, Huichapan, Hidalgo, México. CP. 42411.

2 Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco km 13.5, Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56250.

3 Posdoctorado SECIHTI-Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Colonia Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. CP. 25315.

Autor para correspondencia: vegach@live.com.mx

Resumen

El maguey pulquero es una especie emblemática de México, por su importancia productiva, ecológica y cultural; sin embargo, a pesar de ello, la reproducción sexual ha sido poco aprovechada, limitando la disponibilidad y conservación de las plantas. En este contexto, la nanotecnología, representa una alternativa innovadora para mejorar el establecimiento inicial del cultivo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la imbibición de semillas de *Agave salmiana* cv. Xaminí en soluciones de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO-NPs) y su combinación con plata (ZnO+Ag1%-NPs) sobre la emergencia y el crecimiento inicial. El estudio se realizó en condiciones semicontroladas en el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Hidalgo, México en 2025. Se evaluaron concentraciones de 50, 100 y 200 mg L^{-1} y un testigo en agua desionizada, bajo un diseño completamente al azar con tres repeticiones. Las variables evaluadas fueron porcentaje de emergencia, días al máximo de emergencia, índice de velocidad de emergencia y altura de hoja cotiledonar. Los datos se analizaron mediante Anova y prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los resultados mostraron que los tratamientos se mantuvieron estadísticamente similares en el porcentaje de emergencia, con valores superiores al 90%, promoviendo una emergencia más rápida y uniforme y reduciendo hasta nueve días el tiempo necesario para alcanzar el máximo establecido, principalmente en los tratamientos con ZnO+Ag 1%. Las concentraciones intermedias favorecieron el crecimiento inicial, incrementando hasta 33% la altura de la hoja cotiledonar y mejorando el índice de velocidad de emergencia. El efecto positivo se atribuye al zinc, elemento necesario en procesos fisiológicos esenciales relacionados al crecimiento vegetal, así como al posible efecto de estimulación fisiológica de la plata en bajas concentraciones. La imbibición de semillas con nanopartículas mejora el establecimiento inicial de A. salmiana, representando una herramienta prometedora para la propagación y conservación de esta especie de alto valor en México.

Palabras clave:

establecimiento inicial, maguey pulquero, nanotecnología.

License (open-access): Este es un artículo publicado en acceso abierto bajo una licencia **Creative Commons**

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4213

Introducción

En agave pulquero (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck cv. 'Xaminí') es un cultivo de importancia económica (SIAP, 2026), ecológica (Mota *et al*., 2024), cultural (Navarrete y García, 2021) y gastronómica (Velázquez *et al*., 2021) debido a su alta capacidad de adaptación a condiciones ambientales limitadas (Roldan-Cruz *et al*., 2023).

En el estado de Hidalgo se produce el 54% de la producción nacional (SIAP, 2026); sin embargo, la producción de plantas de esta especie se ha disminuido durante los últimos 30 años en un 56% (Soto-Alarcón *et al*., 2022), debido al predominio de la reproducción asexual y abandono del cultivo (Sánchez *et al*., 2024) y dificultando las estrategias de conservación, manejo y producción de plántulas (Trejo *et al*., 2020).

Las investigaciones en agronomía se realizan en base a prácticas sostenibles (Cerroblanco-Vázquez, 2025), siendo la nanotecnología, importante en este sentido (Zulfiqar *et al*., 2019). Las nanopartículas de zinc y plata han mostrado efectos positivos en germinación de semillas (Spinoso-Castillo *et al*., 2017; Mazumder *et al*., 2020), desarrollo de raíces y crecimiento de plantas (Shaik *et al*., 2020).

El uso de nanopartículas en plantas minimiza el uso de fertilizantes, aumentan la disponibilidad de nutrientes y la eficiencia de estos (Nandhini *et al*. 2019), además de mostrar efectos positivos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas, en comparación del uso de fertilizantes usados de forma convencional (Kolěncík *et al*., 2019).

Sin embargo, la información sobre su uso en la reproducción sexual de *A. salmiana* es inexistente. El objetivo del estudio fue determinar el efecto de la imbibición de semillas en solución de nanopartículas de óxido de zinc y de óxido de zinc en combinación con plata en la emergencia y desarrollo inicial de plántulas.

Materiales y métodos

El trabajo se realizó en el Instituto Tecnológico Superior de Huichapan, Huichapan, Hidalgo, México durante 2025. Se utilizaron semillas de *A. salmiana* del cv. Xaminí, colectadas en el Valle del Mezquital, Hidalgo entre las coordenadas geográficas latitud: 20° 22' 12" latitud norte, 99° 39' 36" longitud oeste.

Tratamientos y manejo experimental

Las semillas se embebieron durante 24 h en soluciones de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO-NPs) y óxido de zinc combinadas con plata (ZnO + Ag1%-NPs) a 50, 100 y 200 mg L^{-1} (Akbay and Yalçın, 2025).

Los tratamientos consistieron en distintas concentraciones utilizadas para la imbibición: T1= testigo (las semillas se embebieron en agua desionizada), T2= 50 mg L^{-1} de ZnO-NPs, T3= 100 mg L^{-1} de ZnO-NPs, T4= 200 mg L^{-1} de ZnO-NPs, T5= 50 mg L^{-1} de ZnO + Ag-NPs, T6= 100 mg L^{-1} de ZnO+ Ag-NPs y T7= 200 mg L^{-1} de ZnO + Ag-NPsl.



DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4213

Las semillas se sembraron a 0.5 cm de profundidad en charolas de poliestireno de 50 cavidades, colocando una semilla por cavidad utilizando turba comercial peatmoss como sustrato, las cuales se mantuvieron en condiciones semicontroladas (25 ±5 °C, fotoperiodo 12:12 h y 60 ±10% HR) en cámara bioclimática Prendo® modelo CB-14. El riego se suministró cada 48 h por aspersión con agua corriente, manteniendo la humedad a capacidad de campo.

Para cada tratamiento se realizaron tres repeticiones, y cada repetición consistió en una charola.

Variables evaluadas

Porcentaje de emergencia (PE)

Se contabilizo cada una de las plántulas emergidas hasta el día 19 después de la siembra (dds) (día en el que se presentó el mayor porcentaje de emergencia en los tratamientos), los datos se convirtieron a porcentaje de emergencia utilizando la siguiente ecuación:

$$\%\ \text{de emergencia} = \frac{\text{número de plántulas emergidas en el último conteo}}{\text{número de semillas sembradas}} \times 100$$

Días a los que se obtuvo el mayor porcentaje de emergencia (DME)

Se contabilizaron los días transcurridos hasta el día en el que se obtuvo el mayor porcentaje de emergencia.

Índice de velocidad de emergencia (IVE)

Se obtuvo a través del conteo diario de las plántulas emergidas. Se calculó mediante la expresión propuesta por Maguire (1962):

$$\text{IVE} = \sum_{i=1}^{n} \frac{X_i}{N_i}$$

Donde: IVE= índice de velocidad de emergencia; X_i= número de plántulas emergidas por día; N_i= número de días después de la siembra; n= número de conteos 1, 2 …, n conteos.

Altura de hoja cotiledonar (AC

Se obtuvo a los 19 dds, midiendo la longitud de la hoja cotiledonar utilizando un vernier metálico (marca Truper® con rango 0-150 mm).

El diseño experimental fue completamente al azar. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (Anova) utilizando el paquete estadístico Minitab® y para identificar las diferencias entre los tratamientos se utilizó una prueba de medias de Tukey ($p \leq 0.05$).

Resultados y discusión

La imbibición de semillas con nanopartículas, tuvo un efecto significativo sobre la emergencia y el crecimiento inicial de *A. salmiana*. Los tratamientos redujeron el tiempo requerido para alcanzar el mayor porcentaje de emergencia y aumentaron el índice de velocidad de emergencia respecto al testigo.

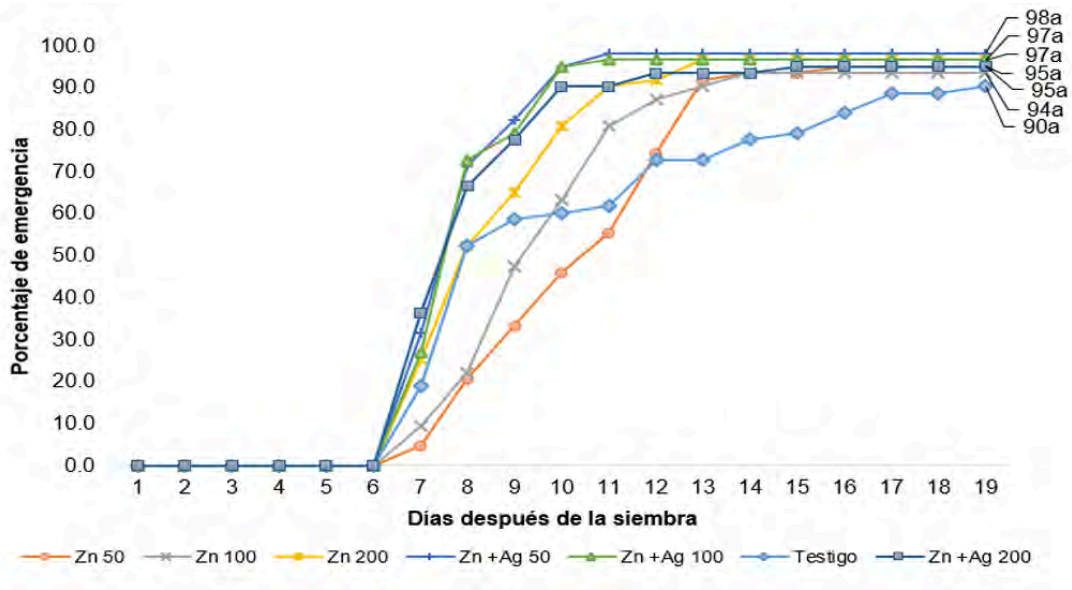
Porcentaje de emergencia

El porcentaje de emergencia observado confirma la viabilidad de las semillas. El análisis estadístico indicó que no existen diferencias significativas entre ellos ($p= 0.1641$; $\alpha= 0.05$).

Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas
DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4213

El testigo presentó una emergencia promedio de 90.3 ±4.5%, con mayor variabilidad entre repeticiones (86-95%), en los tratamientos con ZnO 50 mg L^{-1}, el porcentaje de emergencia promedio fue 95 ±5%, sin diferencias estadísticas marcadas frente al testigo (Figura 1).

Figura 1. Porcentaje de emergencia acumulada de semillas sometidas a diferentes tratamientos con nanopartículas de ZnO y ZnO+Ag. Líneas con letras distintas indican diferencias significativas (p≤ 0.05).



En contraste, los tratamientos con ZnO100 y ZnO200 mostraron valores más estables y elevados, con promedios de 93.3 ±2.9% y 96.7 ±2.9%. Los tratamientos con ZnO+Ag NPs presentaron los valores más consistentes, con promedios de 98.3 ±2.9% en Zn+Ag 50 mg L^{-1}, 96.7 ±2.9% en Zn +Ag100 mg L^{-1} y 95 ± 0% en Zn+Ag 200 mg L^{-1}, aunque ningún tratamiento mostró diferencia estadística, fueron superiores al testigo.

El estudio de Sturikova *et al*. (2018), mencionan que el zinc, es un micronutriente biológico que promueve el metabolismo de auxinas para el crecimiento de plantas, incidiendo en elongación y división celular, así como su actividad protectora ante estrés ambiental y estabilizador de membranas celulares, promoviendo el desarrollo inicial de cultivos.

Días a los que se obtuvo el mayor porcentaje de emergencia (DME

Los tratamientos con nanopartículas redujeron significativamente el tiempo de emergencia con respecto al testigo (p= 0.0001; α= 0.05).

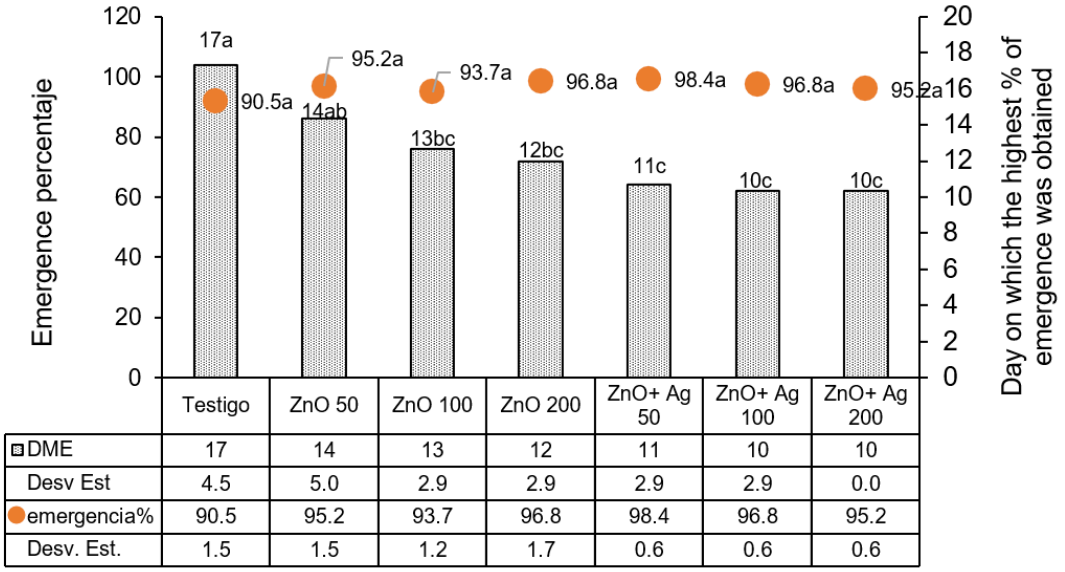
El testigo alcanzó el máximo de emergencia entre 16 y 19 días (d), con un promedio de 17.3 ±1.5 d, siendo el tratamiento más lento, la aplicación de ZnO 50 mg L^{-1} redujo los DME a valores entre 13 y 16 d (promedio 14.3 ±1.5 d), mientras que ZnO 100 mg L^{-1} lo redujo de forma más marcada (12-14 d, promedio 12.7 ±1.2 d). El tratamiento ZnO 200 mg L^{-1} mostró valores de 10-13 d (promedio 12 ±1.7 d), lo que representa una reducción de hasta 5 d respecto al testigo (Figura 2).



Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4213

Figura 2. Porcentaje de emergencia (puntos) y día en que se obtuvo el mayor porcentaje de emergencia (barras) en semillas sometidas a diferentes tratamientos con nanopartículas de ZnO y ZnO+Ag. Barras y puntos con letras distintas indican diferencias significativas (p≤ 0.05).



	Testigo	ZnO 50	ZnO 100	ZnO 200	ZnO+ Ag 50	ZnO+ Ag 100	ZnO+ Ag 200
DME	17	14	13	12	11	10	10
Desv Est	4.5	5.0	2.9	2.9	2.9	2.9	0.0
emergencia%	90.5	95.2	93.7	96.8	98.4	96.8	95.2
Desv. Est.	1.5	1.5	1.2	1.7	0.6	0.6	0.6

Los tratamientos combinados ZnO+Ag alcanzaron el mayor porcentaje de emergencia en el menor tiempo. ZnO+Ag 50 mg L^{-1}, ZnO+Ag 100 mg L^{-1} y Zn+Ag 200 mg L^{-1} registraron promedios de 10.7 ±0.6, 10.3 ±0.6 y 10.3 ±0.6 d, respectivamente, siendo estadísticamente inferiores al testigo y a los tratamientos con ZnO solo (Tukey, p≤ 0.05). Esta reducción equivale a un adelanto de 6-9 d en el establecimiento inicial.

En forma nanoparticulada, el ZnO presenta una mayor área superficial y reactividad, lo que facilita su interacción con la cubierta seminal y su posible ingreso durante la imbibición, favoreciendo procesos metabólicos tempranos asociados a la emergencia (Mazumder *et al*., 2020; Shaik *et al*., 2020), lo anterior se relaciona con los resultados obtenidos en el presente estudio, donde los tratamientos con ZnO-NPs y ZnO+Ag-NPs redujeron significativamente los días necesarios para alcanzar el mayor porcentaje de emergencia y aumentaron el índice de velocidad de emergencia, promoviendo una emergencia más rápida y uniforme de las plántulas de *A. salmiana*.

Se ha reportado que las ZnO-NPs incrementan la velocidad y uniformidad de la germinación y emergencia en cultivos agrícolas, atribuyéndose al aumento en la actividad antioxidante y la movilización de reservas durante la fase heterotrófica inicial (Mazumder *et al*., 2020; Manh-Cuong *et al*., 2021).

Lo cual coincide con lo reportado por Pivaral *et al*. (2026) sobre la importancia del uso de nanopartículas en plantas. Méndez-Andrade *et al*. (2024) reportan que las nanopartículas de plata mejoran la absorción de agua al activar enzimas necesarias para la germinación.

Sin embargo, la respuesta positiva no lineal, concuerda con el fenómeno conocido como hormesis, la cual describe una estimulación biológica a bajas dosis y una inhibición a concentraciones elevadas, atribuida a la generación de estrés oxidativo cuando se supera la capacidad antioxidante de las células (Calabrese, 2008; Calabrese *et al*., 2021).

En este sentido, se ha documentado que las nanopartículas pueden activar respuestas antioxidantes en las plantas (Moreno-Guerrero *et al*., 2025). Estudios previos en tomate, han reportado efectos similares dependientes de la dosis de nanopartículas de plata, donde las dosis altas mostraron efectos negativos (Noori *et al*., 2020).

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4213

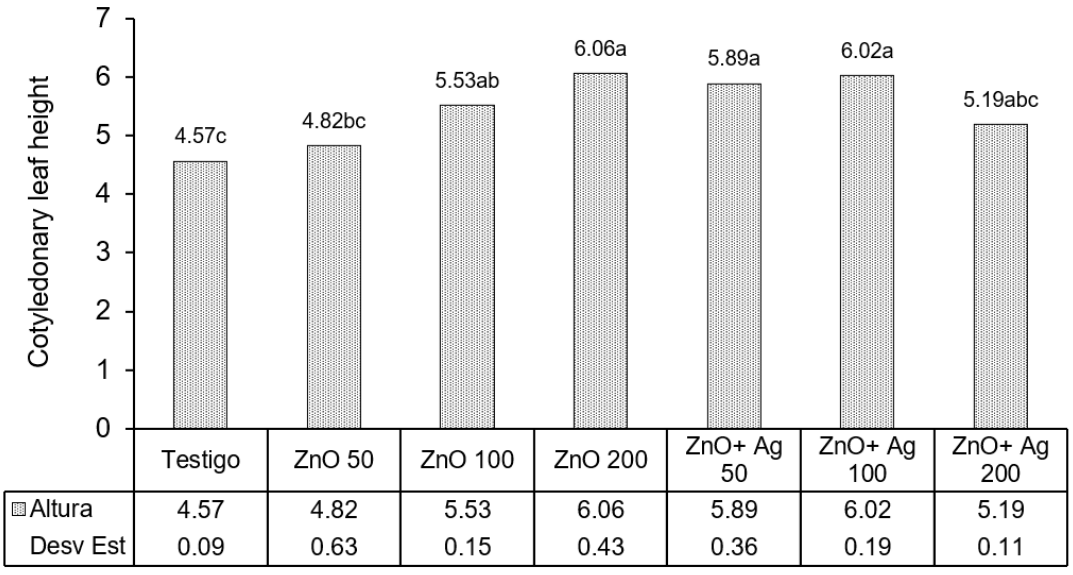
Estos resultados adquieren relevancia considerando que la propagación sexual de *A. salmiana* ha sido poco utilizada en sistemas productivos, a pesar de su importancia para la conservación y sostenibilidad del cultivo (Trejo *et al*., 2020; Soto-Alarcón *et al*., 2022), representando una herramienta biotecnológica prometedora para mejorar en las plantas su capacidad para absorber nutrientes y crecer con mayor velocidad (Lira *et al*., 2018).

La imbibición de semillas con ZnO-NPs y ZnO+Ag-NPs mejora significativamente la emergencia de *A. salmiana*, particularmente al reducir el tiempo necesario para alcanzar altos porcentajes de emergencia, lo cual coincide con reportes previos en otros cultivos y refuerza el potencial de la nanotecnología como alternativa sostenible en la propagación de especies de interés agrícola y ecológico (Rodríguez-González *et al*., 2024), al respecto, Raliya *et al*. (2017), quienes reportan que la nanotecnología mejora la eficiencia en el uso de nutrientes e incrementa la productividad de las plantas.

Altura de hoja cotiledonar (AC

El análisis de varianza muestra diferencias estadísticas significativas en la altura de la hoja cotiledonar entre tratamientos (p= 0.0003; α= 0.05), evidenciando un efecto del tipo y concentración de nanopartículas aplicadas (Figura 3).

Figura 3. Altura de plántulas (cm) de *A. salmiana* en respuesta a diferentes concentraciones de nanopartículas. Barras con letras distintas indican diferencias significativas (p≤ 0.05).



	Testigo	ZnO 50	ZnO 100	ZnO 200	ZnO+ Ag 50	ZnO+ Ag 100	ZnO+ Ag 200
Altura	4.57	4.82	5.53	6.06	5.89	6.02	5.19
Desv Est	0.09	0.63	0.15	0.43	0.36	0.19	0.11

El tratamiento testigo presentó las menores alturas, con valores entre 4.47 y 4.65 cm y un promedio de 4.56 ±0.09 cm, lo que indica un crecimiento inicial limitado en ausencia de nanopartículas. Los tratamientos con ZnO 50 mg L^{-1} mostraron alturas superiores (4.25-5.48 cm, promedio 4.82 ±0.63 cm), sin diferencias estadísticas con respecto al testigo (Tukey, p> 0.05).

Al incrementar la concentración de ZnO a 100 mg L^{-1}, la altura aumentó significativamente (5.41-5.71 cm, promedio 5.52 ±0.15 cm), representando un incremento de 21% respecto al testigo. El tratamiento ZnO 200 mg L^{-1} presentó un aumento en la altura (5.80-6.58 cm, promedio 6.06 ±0.43 cm), siendo estadísticamente superior al testigo y a ZnO 50 (Tukey, p≤ 0.05).

Este incremento equivale a un aumento de 33% en comparación con el control. Los tratamientos combinados ZnO+Ag mostraron un comportamiento diferenciado. Zn+Ag50 y Zn

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4213

+Ag100 alcanzaron las mayores alturas registradas, con promedios de 5.89 ±0.36 cm y 6.02 ±0.19 cm, respectivamente, sin diferencias estadísticas entre ellos, pero significativamente superiores al testigo y a ZnO 50 (Tukey, p≤ 0.05).

En Zn+Ag200, la altura disminuyó (5.13-5.32 cm, promedio 5.19 ±0.11 cm), sin diferencias estadísticas respecto a ZnO100, lo que muestra un efecto inhibitorio a concentraciones elevadas) (Figura 3). Este comportamiento corresponde a un efecto hormético, caracterizado por la estimulación a bajas dosis y la inhibición a concentraciones elevadas, reportado para nanopartículas metálicas (Calabrese *et al*., 2021).

Lo mencionado por Manh-Cuong *et al*. (2021) refieren a que el efecto positivo del ZnO se asocia a su función como micronutriente esencial y regulador del metabolismo enzimático, mientras que la plata, en bajas concentraciones, puede potenciar la respuesta fisiológica; sin embargo, concentraciones elevadas pueden generar estrés oxidativo, afectando el crecimiento inicial de las plántulas (Shaikhaldein, 2020).

Índice de velocidad de emergencia (IVE

El análisis de varianza mostró diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos (p valor= 0.0001; α= 0.05). El testigo presentó los valores más bajos de esta variable con un promedio de 2.09 ±0.11, indicando una emergencia más lenta y menos uniforme. Los tratamientos con ZnO a 50 mg L^{-1} mostraron valores intermedios de IVE (1.78-2.22, promedio 1.97 ±0.22), sin diferencias estadísticas significativas con respecto al testigo.

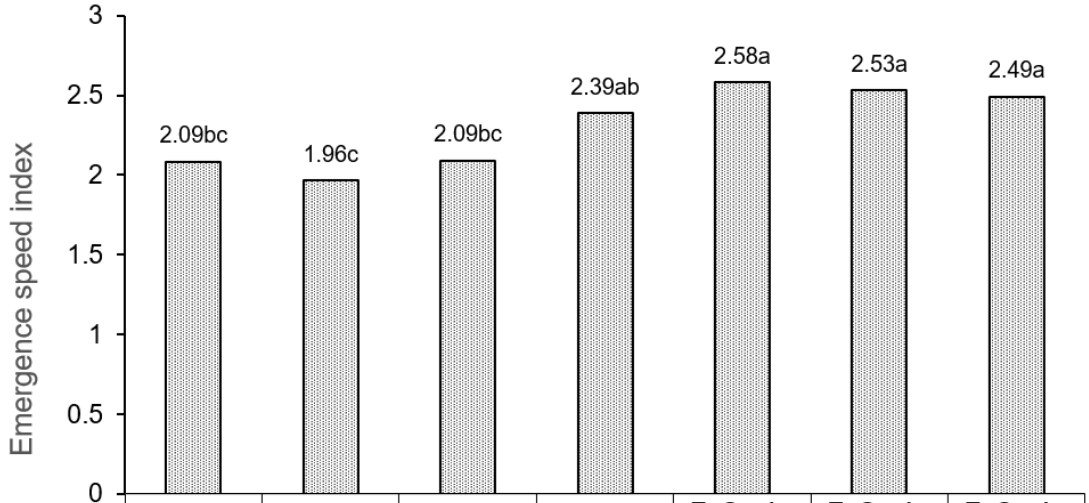
Al incrementar la concentración de ZnO a 100 mg L^{-1}, el IVE aumentó significativamente (2-2.24, promedio 2.09 ±0.13), mientras que ZnO a 200 mg L^{-1} alcanzó valores significativamente superiores (2.27-2.5, promedio 2.39 ±0.12), representando un incremento aproximado del 14-20% respecto al testigo.

Las combinaciones de ZnO+Ag registraron los valores más altos de IVE en el estudio. ZnO+Ag 50 mg L^{-1} presentó un promedio de 2.58 ±0.05, Zn+Ag100 mg L^{-1} de 2.53 ±0.02 y ZnO+Ag 200 mg L^{-1} de 2.49 ±0.1, siendo estadísticamente superiores al testigo y a los tratamientos con ZnO solo (Tukey, p# 0.05) (Figura 4).



DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4213

Figura 4. Índice de velocidad de emergencia de semillas de *A. salmiana* cv. Xaminí en respuesta a diferentes concentraciones de nanopartículas. Barras con letras distintas indican diferencias significativas (p≤ 0.05).



	Testigo	ZnO 50	ZnO 100	ZnO 200	ZnO+ Ag 50	ZnO+ Ag 100	ZnO+ Ag 200
IVE	2.09	1.96	2.09	2.39	2.58	2.53	2.49
Desv Est	0.11	0.22	0.13	0.12	0.05	0.02	0.10

Los resultados evidencian una emergencia más rápida y uniforme de las plántulas. En conjunto con otros elementos el zinc a concentraciones bajas puede mejorar funciones celulares específicas en las plantas como la fotosíntesis, respiración, fijación de nitrógeno entre otras (Shahid *et al*., 2015).

Conclusiones

La imbibición de semillas de *Agave salmiana* Cv. Xaminí con nanopartículas de óxido de zinc y su combinación con plata favoreció la emergencia y el crecimiento inicial de las plántulas bajo condiciones semicontroladas.

Se confirma que la aplicación de nanopartículas durante la imbibición de semillas representa una alternativa biotecnológica prometedora para mejorar el establecimiento inicial, fortalecer la propagación sexual y contribuir a la conservación de *A. salmiana*.

Bibliografía

1 Akbay, B. y Yalç#n, F. S. 2025. Efecto del pretratamiento con nano ZnO en la germinación y la longitud de la raíz de semillas de soja (*Glycine max* L.). International. Journal of Secondary Metabolite. 12(1):204-215. https://doi.org/10.21448/ijsm.1527985.

2 Calabrese, E. J. 2008. Converging concepts: adaptive response, preconditioning, and the Yerkes-Dodson law are manifestations of hormesis. Ageing Research Reviews. 7(1):8-20. https://doi.org/10.1016/j.arr.2007.07.001.

3 Calabrese, E. J.; Agathokleous, E.; Kapoor, R.; Dhawan, G. and Calabrese, V. 2021. Luteolin and hormesis. Mechanisms of Ageing and Development. 19:111559. https://doi.org/10.1016/j.mad.2021.111559.

4 Cerroblanco-Vázquez, V.; Vasco-Leal, J. F. y Contreras-Medina, D. I. 2025. Innovación y tecnología para una agricultura mexicana sostenible: un estudio cualitativo. RAN-Revista Academia y Negocios. 11(1):1-15. https://doi.org/10.29393/RAN11-2ITVC30003.

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4213

5 Lira, S. R. H.; Méndez, A. B.; Santos, V. G. D. y Vera R.; I. 2018. Potencial de la nanotecnología en la agricultura. Acta Universitaria. 28(2):9-24. https://doi.org/10.15174/au.2018.1575.

6 Maguire, J. D. 1962. Speed of germination-aid selection and evaluation for seedling emergence and vigor. Crop Science. 2(2):176-177. https://doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x.

7 Manh-Cuong, D.; Cong-Du, P.; Tung, H. T.; Ngan, H. T. M.; Luan, V. Q.; Phong, T. H.; Khai, H. D.; Phuong, T. T. B. and Nhut, D. T. 2021. Silver nanoparticles as an effective stimulant in micropropagation of *Panax vietnamensis*-a valuable medicinal plant. Plant Cell, Tissue and Organ Culture. 143(3)577-588. https://doi.org/10.1007/s11240-021-02095-2.

8 Mazumder, J. A.; Khan, E.; Perwez, M.; Gupta, M.; Kumar, S.; Raza, K. y Sardar, M. 2020. Exposición de ZnO a nanoescala biosintetizado a la planta de cultivo *Brassica juncea*: aspectos morfológicos, bioquímicos y moleculares. Scientific Reports. 10:8531. https://doi.org/10.1038/s41598-020-65271-y.

9 Méndez-Andrade, R.; Ruiz-Torres, N. A.; Wang, Y.; García-Cerdac, L. A. and Reyes, I. V. 2024. Enhanced Tomato seed germination and seedling growth through oxidative stress using biogenic silver nanoparticles. Revista Terra Latinoamericana. 42.

10 Moreno-Guerrero, D. E.; López-Collado, C. J.; Leyva-Mir, S. G.; Chávez-Franco, S. H.; Alonso-López, A. y Platas-Rosado, D. E. 2025. Nanopartículas de plata en la calidad de la fresa. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 16(6):e3808. https://doi.org/10.29312/remexca.v16i6.3808.

11 Mota, R. I. F.; Rodríguez-Rosales, M. D. J.; Martínez-Roldán, A.; Gómez, V. J. M.; De la Peña, A. A. y Hernández, M. G. C. 2024. El agave en México: su aplicación como adsorbente para la remoción de contaminantes en el agua. Agraria. 21(3):5-14. https://doi.org/10.59741/agraria.v21i3.623.

12 Nandhini, M. R.; Rajini, S. B., Udayashankar, A. C., Niranjana, S. R., Lund O. S.; Shetty, H. S. and Prakash, H. S. 2019. Biofabricated zinc oxide nanoparticles as an eco-friendly alternative for growth promotion and management of downy mildew of pearl millet. Crop Protection. 121:103-112. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.03.015.

13 Navarrete, T. M. C. y García, M. A. C. 2021. El pulque: la bebida de los dioses con valor y tradición milenaria. Journal of Tourism and Heritage Research. 4(1):20-36. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7907925.

14 Noori, A.; Donnelly, T.; Colbert, J.; Cai, W.; Newman, L. A. and White, J. C. 2020. Exposure of tomato (*Lycopersicon esculentum*) to silver nanoparticles and silver nitrate: physiological and molecular response. International Journal of Phytoremediation. 22(1):40-51. https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1634000.

15 Pivaral, C. A. G.; Flores, H. E. A.; Moreno, R. A.; Galindo, G. M. y Galindo, G. A. P. 2026. Importancia y perspectiva futura de las nanopartículas para desencadenar metabolitos secundarios en las plantas. Agraria. 23(1): 23(1):e705. https://doi.org/10.59741/agraria.v23i1.705.

16 Raliya, R.; Saharan, V.; Dimkpa, C. y Biswas, P. 2017. Nanofertilizantes para la agricultura de precisión y sostenible: Estado actual y perspectivas futuras. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 66(26):6487-6503. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02178.

17 Rodríguez-González, V. y Díaz-Cervantes, E. 2024. Potencial de los nanomateriales en la agricultura: retos y oportunidades. Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología. 17(32):1e-20e. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69802.

18 Roldan-Cruz, E.; Medina-Mendoza, C. y Mendoza-Tolentino, Y. 2023. Políticas públicas para el aprovechamiento sustentable del maguey pulquero (*Agave salmiana*) en

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4213

Hidalgo, México. Investigium IRE: Ciencias Sociales y Humanas. 14(1):137-147. https://doi.org/10.15658/investigiumire.231401.13.

19 Sánchez, L. A.; Rivera, R. J. M. y Velázquez, C. E. 2024. Management and cultural preservation of maguey (*Agave salmiana var. salmiana*) in San Mateo Tlajomulco, Hidalgo. Textual. 83(1):137-171. https://doi.org/10.5154/r.textual/2023.83.06.

20 Shahid, M., Khalid, S.; Abbas, G.; Shahid, N.; Nadeem, M.; Sabir, M.; Aslam, M. y Dumat, C. 2015. Heavy metal stress and crop productivity. In: Hakeem, K. (Ed.). Crop production and global environmental issues. Springer. 1-25 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4-1.

21 Shaik, A. M.; David, R. M. and Rama, S. R. D. 2020. Green synthesis of zinc oxide nanoparticles using aqueous root extract of *Sphagneticola trilobata* Lin and investigate its role in toxic metal removal, sowing germination and fostering of plant growth. Inorganic and Nano-Metal Chemistry. 50(7):569-579. https://doi.org/10.1080/24701556.2020.1722694.

22 Shaikhaldein, H. O.; Al-Qurainy, F.; Nadeem, M.; Khan, S.; Tarroum, M. and Salih, A. M. 2020. Biosynthesis and characterization of silver nanoparticles using *Ochradenus arabicus* and their physiological effect on *Maerua oblongifolia* raised *in vitro*. Scientific Reports. 10:17569. https://doi.org/10.1038/s41598-020-74675-9.

23 SIAP. 2026. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario estadístico de la producción agrícola 2024 (Maguey pulquero). Gobierno de México. http://www.gob.mx/siap.

24 Soto-Alarcón, J. M.; González-Gómez, D. X.; González-Olivares, L. G. y Castañeda-Ovando, A. 2022. Hacer comunes con el maguey pulquero en Hidalgo, México. Hatso Hnini. Revista de Investigación de Paisajes y Espacio Construido. 1(2):1-18. https://doi.org/10.47386/2022v1n2ijdahc.

25 Trejo, L.; Reyes, M.; Cortés-Toto, D.; Romano-Grande, E. y Muñoz-Camacho, L. L. 2020. Morphological diversity and genetic relationships in pulque production agaves in Tlaxcala, Mexico, by means of unsupervised learning and gene sequencing analysis. Frontiers in Plant Science. 11:524812. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.524812.

26 Zulfiqar, F.; Navarro, M.; Ashraf, M.; Akram, N. A. y Munné-Bosch, S. 2019. Uso de nanofertilizantes para la agricultura sostenible: ventajas y limitaciones. Plant Science. 289:110270. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110270.



Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas

DOI: https://doi.org/10.29312/remexca.v17i7.4213

Estimulación de emergencia y crecimiento inicial de *Agave salmiana* mediante nanopartículas metálicas

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 May 2026
Date accepted: 01 September 2026
Publication date: 07 November 2026
Publication date: 2026
Volume: 17
Issue: 7
Electronic Location Identifier: e4213
DOI: 10.29312/remexca.v17i7.4213

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

establecimiento inicial
maguey pulquero
nanotecnología

Counts

Figures: 4
Tables: 0
Equations: 2
References: 26