



DOI: 10.29298/rmcf.v15i86.1403

Artículo de investigación

## Germinación de semillas en *Agave potatorum* Zucc.

### Seed Germination in *Agave potatorum* Zucc.

Eulalia Edith Villavicencio-Gutiérrez<sup>1\*</sup>, Ma. Alejandra Torres-Tapia<sup>2</sup>, Jorge Méndez González<sup>3</sup>, Carolina Curiel-López<sup>2</sup>, Félix Sánchez Pérez<sup>4</sup>

Fecha de recepción/Reception date: 28 de junio de 2023.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 12 de agosto de 2024

<sup>1</sup>Campo Experimental Saltillo. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.

<sup>2</sup>Departamento de Fitomejoramiento, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México.

<sup>3</sup>Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México.

<sup>4</sup>Consultor estadístico independiente.

\*Autor para correspondencia; correo-e: villavicencio.edith@inifap.gob.mx

\*Corresponding author; e-mail: villavicencio.edith@inifap.gob.mx

#### Resumen

El estudio de las semillas incluye ensayos que permiten caracterizar y definir la aptitud del germoplasma para conservar o propagar especies. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes tratamientos pregerminativos sobre el porcentaje de germinación de *Agave potatorum*. Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 5×3×2 de efectos fijos; se evaluaron cinco tratamientos pregerminativos: T1: 500 ppm de ácido giberélico (AG<sub>3</sub>); T2: 1 000 ppm de AG<sub>3</sub>; T3: 50 % de inoculación de micorriza (23 esporas gramo<sup>-1</sup>) (*Glomus intraradices*); T4: 100 % de micorriza (46 esporas gramo<sup>-1</sup>) y T5: Testigo (agua destilada), aplicados en tres tamaños de semilla (chica, mediana y grande) y dos fechas de monitoreo: F1=10 y F2=15 días; la variable evaluada fue la germinación (GE, %). Se aplicaron pruebas de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) cuando se obtuvieron diferencias estadísticas entre factores, niveles e interacciones. Los resultados indicaron que la germinación de *A. potatorum* es estadísticamente diferente entre fechas ( $p=0.0004$ ) y tratamientos ( $p=0.0005$ ), pero no en tamaño de semillas ( $p=0.3335$ ). La aplicación de 500 ppm de AG<sub>3</sub> registró una GE de 75 %. Este tratamiento pregerminativo hace más rápida la germinación, mejora la producción de plántulas y maximiza el potencial del lote de semilla. La conservación *ex situ* es fundamental para promover el uso sostenible y revalorizar el potencial del germoplasma, tanto en sus funciones ecológicas como productivas.

**Palabras clave:** Ácido giberélico, Agavoideae, Asparagaceae, germinación, maguey tobalá, micorriza.

#### Abstract

The study of seeds includes tests that allow characterizing and defining the suitability of germplasm to conserve or propagate species. This study aimed to evaluate the effect of different pre-germination treatments on the germination rate of *Agave potatorum*. A completely randomized design with a 5×3×2 fixed-effect factorial arrangement was utilized; five pre-germination treatments were assessed: T1: 500 ppm gibberellic acid (AG<sub>3</sub>); T2: 1 000 ppm AG<sub>3</sub>; T3: 50 % inoculation of mycorrhizae (23 spores gram<sup>-1</sup>) (*Glomus intraradices*); T4: 100 % mycorrhizae (46 spores gram<sup>-1</sup>) and T5: Control (distilled water), applied in three seed sizes (small, medium and large) and two dates of monitoring: D1=10 and D2=15 days; the assessed variable was germination rate (GR, %). Tukey tests ( $\alpha=0.05$ ) were applied when statistical differences between factors, levels, and interactions

were obtained. The results indicated that germination of *A. potatorum* differs statistically between dates ( $p=0.0004$ ) and treatments ( $p=0.0005$ ), but not between seed sizes ( $p=0.3335$ ). The application of 500 ppm AG<sub>3</sub> registered a GR of 75 %. This pre-germination treatment speeds germination, improves seedling production, and maximizes the potential of the seed lot. *Ex situ* conservation is essential to promote sustainable use and revalue the potential of germplasm, both in its ecological and productive functions.

**Keywords:** Gibberellic acid, Agavoideae, Asparagaceae, germination, *Tobalá* agave, mycorrhizae.

## Introducción

*Agave potatorum* Zucc. (maguey papalomé) pertenece a la familia Asparagaceae y subfamilia Agavoideae (APG, 2016; García-Mendoza *et al.*, 2019); se distribuye desde el extremo oriental de la cuenca del Río Balsas, el Valle de Tehuacán-Cuicatlán, hasta las partes bajas de la Sierra Mixteca y montañas centrales de Oaxaca (García-Mendoza, 2010). Es una especie no maderable, se usa para producir mezcal “tobalá”, el cual tiene alto potencial de mercado (Barrientos *et al.*, 2019).

En Oaxaca, su cultivo es incipiente (García *et al.*, 2004) y el acaule o “piña” requiere entre 8 y 12 años para su aprovechamiento (Martínez-Ramírez *et al.*, 2013) que se realiza antes de su floración, lo que interrumpe el proceso de reproducción sexual, limita la producción de semillas, la cual es fuente de germoplasma para una propagación más efectiva (García-Mendoza, 2010). La reproducción asexual es inexistente, porque no produce propágulos vegetativos (Torres *et al.*, 2015).

De acuerdo con la Asociación Internacional de Análisis de Semillas, ISTA (ISTA, 2021), la evaluación de la germinación estándar es el procedimiento más común para conocer la calidad fisiológica de un lote de semillas, esta se realiza en condiciones controladas para que las semillas lleven a cabo las etapas o fases de la germinación (García-López *et al.*, 2016).

En *A. potatorum*, la germinación es de tipo epigea, oleoproteaginososa y recalcitrante (Gutiérrez-Hernández *et al.*, 2020). Ortiz-Hernández *et al.* (2018) proponen evaluar la germinación a los 10 y 15 días después de la siembra (dds).

En otras especies como *Agave lechuguilla* Torr., *Agave asperrima* Jacobi, *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck y *Agave striata* Zucc. se ha evaluado la calidad fisiológica de la semilla, el efecto del gradiente de temperatura y potencial hídrico ( $\psi$ ) en la germinación (Ramírez, 2010). En *A. salmiana* se observa una germinación de 95 % (Peña-Valdivia *et al.*, 2006), para *A. mapisaga* Trel. de 70 % y en *A. angustifolia* Haw. subsp. *tequilana* (F. A. C. Weber) Valenz.-Zap. & Nabhan 50 % (Ramírez *et al.*, 2016).

En los procesos de germinación, los hongos micorrízicos arbusculares (HMa) influyen en el ablandamiento de la testa (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2016) y en la producción de fitohormonas en la semilla, como giberelinas y ácido indolacético (Alcántara *et al.*, 2019). Asimismo, los HMa forman asociaciones simbióticas con las plantas e influyen en la captación de fósforo; en agaves su efecto se ha evaluado en el crecimiento de *Agave inaequidens* K. Koch (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2016) y *Agave cupreata* Trel. & A. Berger (Trinidad-Cruz *et al.*, 2017).

*Agave potatorum* es un recurso fitogenético estratégico con valor económico enlazado indisolublemente a la cultura de las comunidades San Miguel Piedras, Nochixtlán, Oaxaca, México, en donde se requiere promover la sustentabilidad del recurso. En este contexto, se planteó como objetivo evaluar el efecto de diferentes tratamientos pregerminativos sobre el porcentaje de germinación, para generar una estrategia de propagación y multiplicación.

## Materiales y Métodos

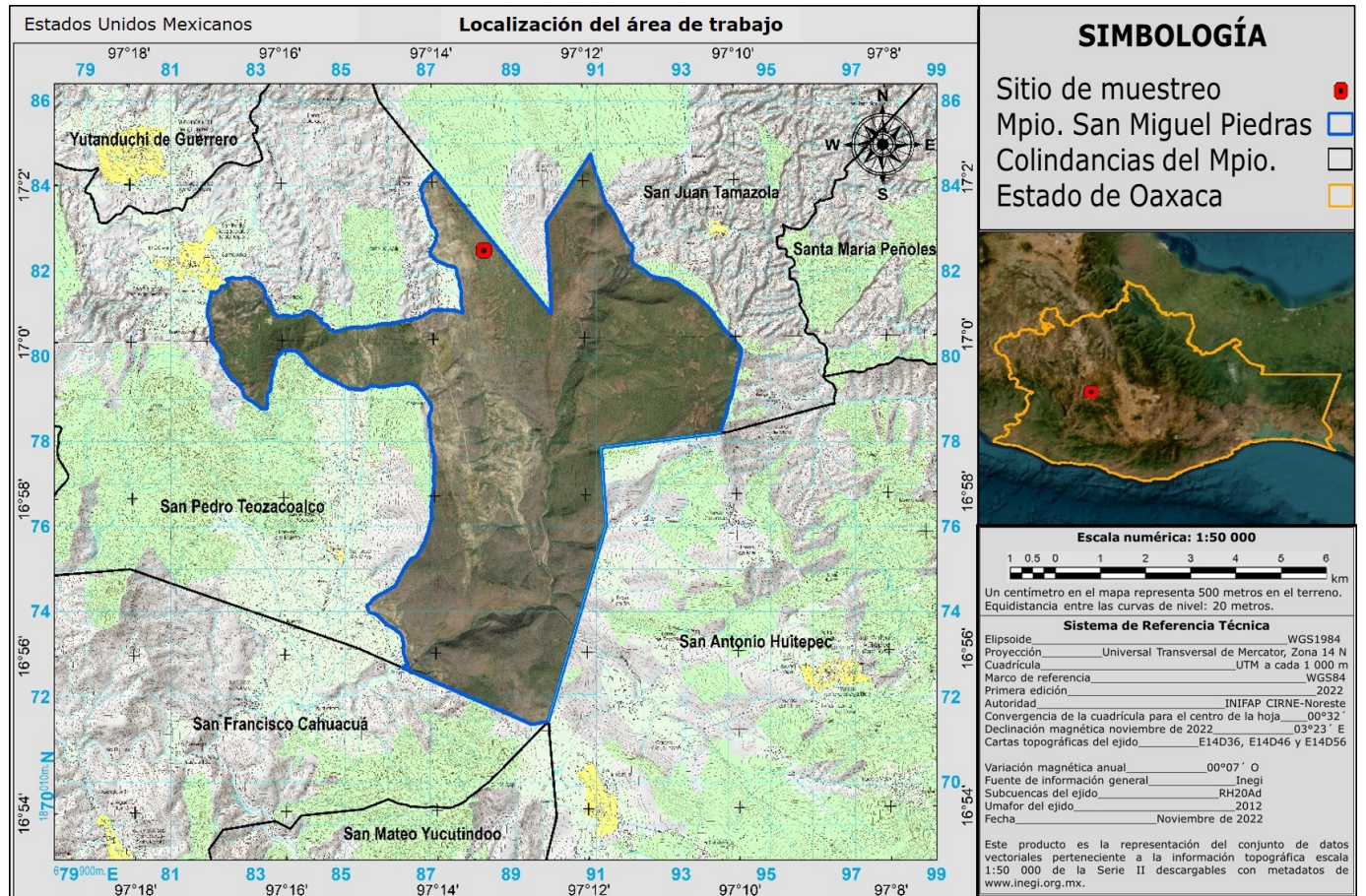
### Especie de estudio

*Agave potatorum* es una planta de entre 30 y 60 cm de altura, de 34 a 60 cm de diámetro, perenne, monocárpica; florece de agosto a noviembre, fructifica de noviembre a marzo y produce semillas una sola vez en su ciclo de vida; alcanza su madurez sexual aproximadamente a los seis años; acaulescente (no genera hijuelos); hojas suculentas, ovadas, de 15 a 35 cm largo y 5 a 10 cm de ancho, de coloración blanquizca a verde, dispuestas en roseta (Gentry, 1982; García-Mendoza, 2010). Se distribuye desde los 1 240 a los 2 400 msnm, asociada con vegetación de pino-encino, selva baja caducifolia y matorral xerófilo con *Quercus* L. Crece en sitios planos o con poca pendiente, sobre suelos arenosos derivados de rocas calizas (Gentry, 1982; Morales *et al.*, 2017; Gutiérrez-Hernández *et al.*, 2020).

### Recolecta de semillas y área de estudio

El sitio de recolecta se ubica en el ejido Guadalupe Victoria, municipio San Miguel Piedras, Nochixtlán, Oaxaca, México; entre las coordenadas 17°01'7.62" N y 97°13'19.27" O, a una altitud de 1 832 m (Calderón de Rzedowski y Germán, 1993); clima tipo semicálido subhúmedo (A)C(w<sub>1</sub>) (García *et al.*,

2004), temperatura media anual de 16.5 °C, precipitación promedio anual de 842.2 mm; suelo tipo Litosol (Inegi, 2018) (Figura 1).



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio en el ejido Guadalupe Victoria, municipio San Miguel Piedras, Nochixtlán, Oaxaca, México.

En febrero de 2021, se recolectaron 80 cápsulas maduras de *A. potatorum* de plantas adultas, seleccionadas con base en su altura (cm), diámetro (cm) y conformación de rosetas (García-Mendoza *et al.*, 2019). Los frutos se colocaron en bolsas de plástico, herméticas y transparentes (10×10 cm) a temperatura ambiente (25 °C).

## **Tratamientos pregerminativos**

Las semillas se mantuvieron durante un año en refrigeración a 4 °C y humedad relativa de 5 %; los ensayos de germinación se realizaron en los laboratorios de Cultivo de Tejidos Vegetales del Campo Experimental Saltillo CIRNE-INIFAP y en el Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTS) de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

En el estudio se utilizó semilla pura (310.27 g) con una viabilidad de 71 %, determinada con la prueba de 2,3,5 trifenil cloruro de tetrazolio (*Sigma-Aldrich*®, EE. UU.) al 0.5 % (ISTA, 2021). La semilla pura se separó por tamaño con un soplador *South Dakota*® modelo CFY-II, con una abertura de 3 cm 1 min<sup>-1</sup>, para obtener tres muestras: semilla chica (186.15 g), mediana (77.56 g) y grande (46.56 g) de acuerdo a la clasificación de Vázquez *et al.* (2011).

En los tres tamaños de semilla (chica, mediana y grande) se evaluaron cinco tratamientos: T1: 500 ppm de ácido giberélico (*Sigma-Aldrich*®, EE. UU.) (AG<sub>3</sub>); T2: 1 000 ppm de AG<sub>3</sub> (solución base de 100 mg de AG<sub>3</sub> en 100 mL de agua destilada); T3: 50 % de inoculación de micorriza (23 esporas g<sup>-1</sup>) (*Glomus intraradices* N. C. Schenck & G. S. Sm. 1982); T4: 100 % de micorriza (46 esporas g<sup>-1</sup>) (solución base 1 g de micorriza en 100 mL de agua destilada); y T5: Agua destilada (testigo).

La prueba de germinación se hizo con base en el ISTA (ISTA, 2021) con la modificación en el número de semillas de cada unidad experimental, debido a la reducida cantidad de semilla pura recolectada. Por cada tamaño de semilla se consideraron 20 como unidad experimental y se establecieron nueve repeticiones por tratamiento. Rao *et al.* (2007) y Di Sacco *et al.* (2020) han sugerido que, para

especies con problemas de regeneración, en especial taxones silvestres, entre 100 y 300 semillas es buen tamaño de muestra para un análisis estadístico.

Cada unidad experimental se colocó en una caja Petri, sobre papel filtro *Whatman*<sup>®</sup> #1, remojado previamente con 3 mL del tratamiento correspondiente. Las nueve repeticiones por tratamiento de los tres tamaños de semilla se colocaron en una cámara de incubación marca *Hoffman*<sup>®</sup> modelo UMF500, a temperatura controlada ( $28 \pm 1$  °C), con un fotoperiodo de 8 h luz y 16 h de oscuridad (ISTA, 2021).

En cada tratamiento se consideraron dos fechas de evaluación: F1=10 dds y F2=15 dds (Ortiz-Hernández *et al.*, 2018). Por cada tamaño de semilla se evaluaron 900, para un total de 2 700.

## Variables evaluadas y análisis estadístico

Se determinó el número de semillas germinadas para obtener el porcentaje de germinación estándar (*GE*) por tratamiento y tamaño de semilla, lo anterior con base en la clasificación de AOSA (1983); la germinación fue la variable dependiente. Los datos se sometieron a un análisis correspondiente a un diseño completamente al azar con arreglo factorial de  $5 \times 3 \times 2$  de efectos fijos con el siguiente modelo:

$$Y_{ijkl} = \mu + F_i + T_j + \tau_k + (FT)_{ij} + (F\tau)_{jk} + (T\tau)_{ik} + (FT\tau)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}; k = 1, \dots, r$$

Donde:

$Y_{ijkl}$  = Variable de respuesta

$\mu$  = Media general

$F_i$  = Nivel *i*-ésimo del factor fecha,  $i = 1, 2$

$T_j$  = Nivel *j*-ésimo del factor tamaño de semilla,  $j = 1, 2, 3$

$\tau_k$  = Efecto del *k*-ésimo tratamiento,  $k = 1, 2, \dots, 5$

$(FT)_{ij}$  = Interacción del factor fecha *i* y tamaño de semilla *j*

$(F\tau)_{jk}$  = Interacción del factor fecha *i* y tratamiento *k*

$(T\tau)_{ik}$  = Interacción entre los factores de tamaño de semilla y tratamiento, en el nivel *i* y *k*

$(FT\tau)_{ijk}$  = Interacción del factor fecha *i*, tamaño de semilla *j* y tratamiento *k*

$\varepsilon_{ijkl}$  = Error experimental,  $\sim NI(0, \sigma^2)$ : es decir, sigue una distribución normal, con media 0 y varianza  $\sigma^2$ , e independiente

Se verificó que los supuestos de homogeneidad de varianza (*Barlett* y *Levene* para las interacciones), de normalidad (*Shapiro-Wilk*), independencia (prueba de rachas) y de no aditividad del modelo (*Tukey*) se cumplieran. Debido a que la variable se expresa en unidades porcentuales, se utilizó la transformación arco seno. Cuando existieron diferencias estadísticas entre factores, niveles e interacciones, se aplicaron pruebas de *Tukey* ( $\alpha=0.05$ ). Para el análisis estadístico se usaron las librerías: '*tidyverse*' y '*agricolae*' del software estadístico *R*® versión 3.5.3 (R Core Team, 2020).



## Resultados y Discusión

### Cumplimiento de los supuestos del análisis de varianza

La homogeneidad de *Barlett* para la variable germinación fue constante para la Fecha ( $p=0.4823$ ), Tamaño ( $p=0.5799$ ) y Tratamientos ( $p=0.2353$ ). La prueba de *Levene* para las interacciones (Fecha×Tamaño×Tratamientos) no rechazó la hipótesis  $H_0$  ( $p=0.9938$ ). Los residuales se distribuyeron de manera normal ( $p=0.3955$ ), fueron independientes ( $p=0.2015$ ) y el modelo fue aditivo (*Tukey*  $p=0.5162$ ).

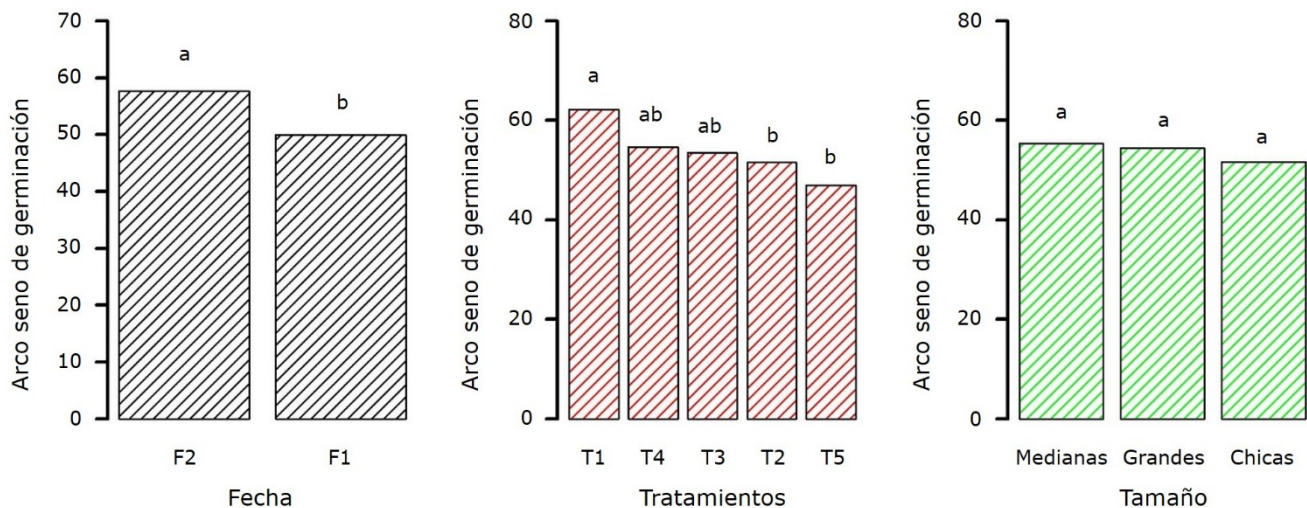
### Germinación de semillas de *Agave potatorum*

Existen diferencias significativas en la germinación de *A. potatorum* entre: Fechas ( $p=0.0004$ ) y Tratamientos ( $p=0.0005$ ), además en las interacciones: Fecha×Tratamientos ( $p=0.0011$ ) y Tamaño×Tratamientos ( $p=0.0012$ ) (Cuadro 1, Figura 2). Se obtuvo un Coeficiente de variación de 18.12 % y el modelo explicó más de 63 % de la variabilidad de la germinación, lo que resulta en un buen modelo.

**Cuadro 1.** Análisis de varianza de las pruebas de germinación de *Agave potatorum* Zucc.

Fuente de variación	G. L.	S. C.	C. M.	Valor de F	Pr(>F)	Significancia
Fecha	1	1 359.90	1 359.87	14.32	0.0004	***
Tamaño	2	212.40	106.20	1.12	0.3335	
Tratamientos	4	2 232.00	558.01	5.88	0.0005	***
Fecha×Tamaño	2	405.60	202.82	2.14	0.1270	
Fecha×Tratamientos	4	1 978.80	494.71	5.21	0.0011	**
Tamaño×Tratamientos	8	2 871.90	358.99	3.78	0.0012	**
Fecha×Tamaño×Tratamientos	8	742.90	92.86	0.98	0.4620	
Residuales	60	5 697.20	94.95			

G. L. = Grados de libertad; S. C. = Suma de cuadrados; C. M. = Cuadrados medios; Pr(>F) = Probabilidad; \*\* = Significativo; \*\*\* = Altamente significativo.



Letras sobre las barras indican los grupos acorde a la prueba de *Tukey* al 95 %. F1 y F2 = Fechas de evaluación de germinación a los 10 y 15 días después de la siembra; T1 = 500 ppm ácido giberélico (AG<sub>3</sub>); T2 = 1 000 ppm ácido giberélico (AG<sub>3</sub>); T3 = 50 % de *Glomus intraradices* N. C. Schenck & G. S. Sm. 1982; T4 = 100 % *G. intraradices*; T5 = Agua destilada (testigo).

**Figura 2.** Efecto de la fecha, tratamientos pregerminativos y tamaño de semillas, sobre la germinación en *Agave potatorum* Zucc.

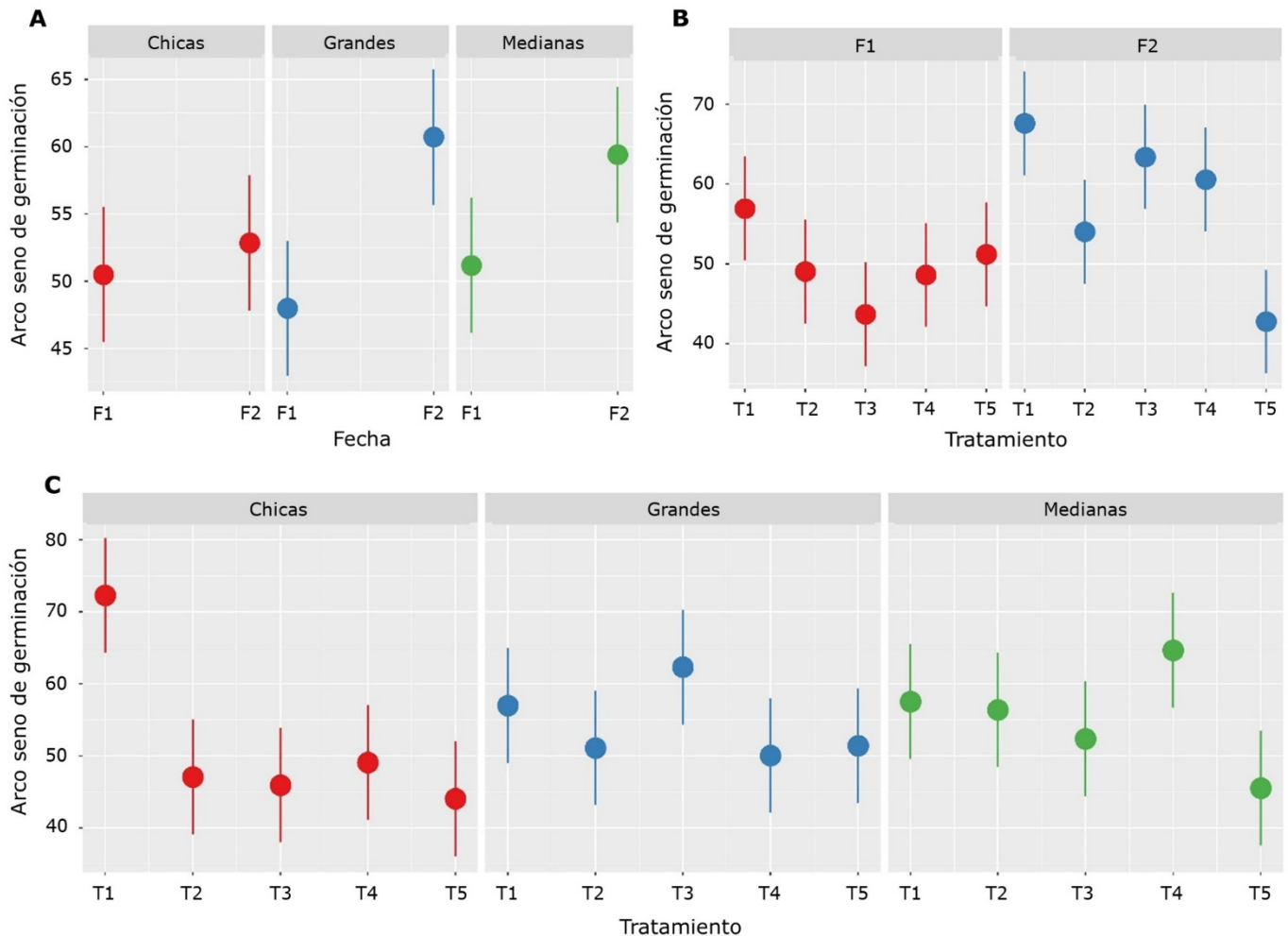
**Fechas de evaluación.** La mayor germinación (69.00 %) de *A. potatorum* se registró a los 15 dds (Cuadro 2; Figura 3A), pero difiere con lo realizado por Ortiz-Hernández *et al.* (2018) quienes, en las mismas condiciones de germinación, obtuvieron entre 82 y 85 % con semillas procedentes de Coixtlahuaca (región Mixteca) y de Zaachila (Valles Centrales) de Oaxaca, respectivamente; ambos sitios con diferencias en altitud (2 500 msnm y 1 650 msnm), precipitación (600 a 700 mm y 800 a 900 mm) y temperatura (5 a 25 °C y 10 a 30 °C), en relación con el sitio de recolecta del presente estudio, lo que muestra la plasticidad fenotípica que tiene la especie y la influencia del ambiente en la capacidad germinativa.

**Cuadro 2.** Estadísticas descriptivas de germinación (%) de *Agave potatorum* Zucc. en unidades originales.

Factor/nivel	n	Mín.	Máx.	Mediana	R. I. C.	Media*	D. E.	E. E.	I. C.	C. V.
Fecha										
F1	2 700	30.00	100.00	60.00	30.00	57.33 a	18.02	2.69	5.41	31.42
F2	2 700	30.00	100.00	70.00	40.00	69.00 b	18.82	2.81	5.65	27.27
Tamaño										
Chicas	900	30.00	100.00	60.00	35.00	59.33 a	19.99	3.65	7.46	33.69
Grandes	900	30.00	100.00	60.00	30.00	64.00 a	19.23	3.51	7.18	30.04
Medianas	900	30.00	90.00	70.00	30.00	66.17 a	18.46	3.37	6.89	27.90
Tratamientos										
T1	540	30.00	100.00	80.00	17.50	75.00 a	19.78	4.66	9.84	26.37
T2	540	30.00	90.00	60.00	27.50	60.56 b	18.30	4.31	9.10	30.22
T3	540	30.00	100.00	60.00	20.00	62.22 ab	19.87	4.68	9.88	31.93
T4	540	40.00	90.00	65.00	30.00	65.00 ab	18.55	4.37	9.23	28.54
T5	540	30.00	90.00	50.00	11.25	53.06 b	14.26	3.36	7.09	26.88

*n* = Número de observaciones; Mín. = Valor mínimo; Máx. = Valor máximo; R. I. C. = Rango intercuantílico; Media\* = Las letras iguales indican que los grupos son estadísticamente iguales al 95 % según la prueba de *Tukey*; D. E. = Desviación estándar; E. E. = Error estándar; I. C. = Intervalo de confianza de la media; C. V. =

Coeficiente de variación (%). F1 y F2 = Fechas de evaluación de germinación a los 10 y 15 días después de la siembra; T1 = 500 ppm ácido giberélico (AG<sub>3</sub>); T2 = 1 000 ppm ácido giberélico (AG<sub>3</sub>); T3 = 50 % de *Glomus intraradices* N. C. Schenck & G. S. Sm. 1982; T4 = 100 % *G. intraradices*; T5 = Agua destilada (testigo).



Entre: A = Fechas×Tamaño de semilla; B = Fechas×Tratamientos; C = Tamaño de semilla×Tratamientos. F1 y F2 = Fechas de evaluación de germinación a los 10 y 15 días después de la siembra; T1 = 500 ppm ácido giberélico (AG<sub>3</sub>); T2 = 1 000 ppm ácido giberélico (AG<sub>3</sub>); T3 = 50 % de *Glomus intraradices* N. C. Schenck & G. S. Sm. 1982; T4 = 100 % *G. intraradices*; T5 = Agua destilada (testigo). El traslape

horizontal de las líneas verticales (dentro de cada figura: A, B o C) indica que las medias son estadísticamente iguales (95 %) según la prueba de *Tukey*.

**Figura 3.** Interacciones de la germinación de *Agave potatorum* Zucc.

Aunque se ha registrado una estrecha relación entre el tamaño de la semilla y el porcentaje de germinación (Vázquez *et al.*, 2011) debido al contenido de reservas y tamaño del embrión, el tamaño de semilla de *A. potatorum* no influyó en el porcentaje de germinación ( $p=0.3335$ , Cuadro 1).

**Efecto de tratamientos.** La mayor germinación de *A. potatorum* (75 %) se obtuvo con la aplicación de ácido giberélico (AG<sub>3</sub>) a 500 ppm (T1); mientras que el resto de los tratamientos (T2-T5) registraron estadísticamente la menor germinación (Figura 3B); esto también ocurre en *Agave lechuguilla*, *A. asperrima*, *A. salmiana* y *A. striata* (Ramírez, 2010). El efecto de este tratamiento muestra la necesidad de aplicar un pregerminativo para mejorar la germinación y optimizar el lote de semilla de *A. potatorum*.

En la misma especie, Ortiz-Hernández *et al.* (2018) registraron una germinación de 4 % sin la aplicación de AG<sub>3</sub>, resultado que corrobora la necesidad de evaluar la calidad fisiológica de la semilla y su respuesta a diferentes tratamientos pregerminativos.

Aunque el AG<sub>3</sub> ha sido documentado para mejorar la germinación en algunas especies (Kaya y Kulan, 2020), en *A. potatorum*, 1 000 ppm de AG<sub>3</sub> tuvieron un efecto inhibitorio, similar a lo observado en otros cultivares (Vásquez *et al.*, 2019), ya que afecta la síntesis de  $\alpha$ -amilasas y enzimas hidrolíticas (Ho *et al.*, 2003). Aunque no existe información del efecto micorrizico sobre la germinación de esta especie, la inoculación solo registró una diferencia de 12 % con respecto al Testigo (T5), en el cual se presentó la menor germinación (53 %); la aplicación de *G. intraradices* pudo influir en la resistencia mecánica de la testa (Quiñones-Aguilar *et al.*, 2016) y en la

estimulación de la producción de fitohormonas como giberelinas y ácido indolacético (Alcántara *et al.*, 2019).

**Interacción Fecha×Tratamiento.** El Anova evidenció que los tratamientos registraron diferente germinación de *A. potatorum* entre Fechas ( $p=0.0011$ ) (Cuadro 1); solo algunas interacciones fueron estadísticamente significativas ( $p<0.05$ , Cuadro 3C, Figura 3B). Lo anterior coincide con estudios previos (Constantino *et al.*, 2010; Quiñones-Aguilar *et al.*, 2016; Alcántara *et al.*, 2019; Cruz-Cárdenas *et al.*, 2021), ya que es dependiente de la fisiología de cada especie.

**Cuadro 3.** Contrastes múltiples de *Tukey*, estadísticamente significativos de la germinación de *Agave potatorum* Zucc.

Contraste	Diferencia	Lím. inferior	Lím. superior	<i>p</i> ajustado	Medias*	
Fecha de evaluación (A)						
F2-F1	7.7742	2.4549	13.0935	0.005	69.00	57.33
Tratamientos (B)						
T5-T1	-15.280	-25.645	-4.915	0.001	53.06	75.00
T2-T1	-10.746	-21.111	-0.381	0.038	60.56	75.00
Fecha: Tratamientos (C)						
F2:T5-F2:T1	-24.861	-41.955	-7.768	0.000	46.11	83.33
F1:T3-F2:T1	-23.930	-41.023	-6.836	0.001	47.78	83.33
F2:T5-F2:T3	-20.639	-37.733	-3.546	0.007	46.11	76.67
F2:T3-F1:T3	19.708	2.614	36.801	0.012	76.67	47.78
F1:T4-F2:T1	-18.999	-36.093	-1.906	0.018	55.56	83.33
F1:T2-F2:T1	-18.579	-35.673	-1.486	0.022	56.67	83.33
F2:T5-F2:T4	-17.813	-34.907	-0.720	0.034	46.11	74.44
F2:T4-F1:T3	16.881	-0.212	33.975	0.056	74.44	47.78
Tamaño de semilla: Tratamientos (D)						
T5:Chicas-T1:Chicas	-28.251	-51.846	-4.657	0.006	48.33	86.67
T5:Medianas-T1:Chicas	-26.765	-50.360	-3.170	0.012	50.83	86.67
T3:Chicas-T1:Chicas	-26.371	-49.965	-2.776	0.015	51.67	86.67
T2:Chicas-T1:Chicas	-25.221	-48.816	-1.626	0.025	53.33	86.67
T4:Chicas-T1:Chicas	-23.214	-46.809	0.381	0.058	56.67	86.67

F1 y F2 = Fechas de evaluación de germinación a los 10 y 15 días después de la siembra; T1 = 500 ppm ácido giberélico (AG<sub>3</sub>); T2 = 1 000 ppm ácido giberélico (AG<sub>3</sub>); T3 = 50 % de *Glomus intraradices* N. C. Schenck & G. S. Sm. 1982; T4 = 100 % *G. intraradices*; T5 = Agua destilada (testigo). Medias\* en unidades originales, correspondientes a las variables de la columna 1, respectivamente.

**Interacción Tamaño×Tratamientos.** Los resultados de los contrastes de medias de *Tukey* mostraron que la mayor germinación (86.67 %) de *A. potatorum* ocurrió aplicando T1, en semillas chicas (Cuadro 3D, Figura 3C). No se observaron diferencias estadísticamente significativas en la germinación de *A. potatorum* entre los tratamientos aplicados a las semillas grandes.

Los resultados indican que el uso de AG<sub>3</sub> mejora significativamente la germinación de las semillas de *A. potatorum*, pero en dosis altas se inhibe la acción hormonal de la semilla. El efecto inhibitorio también puede deberse a una alteración de otras fitohormonas como citoquininas, poliaminas y ácido jasmónico que también participan en el desarrollo embrionario y radicular durante la germinación (Alcántara *et al.*, 2019).

Se ha observado que la semilla grande, al tener un embrión de mayor tamaño y peso, tiene una capacidad germinativa que le permite desnaturalizar algunas proteínas, sintetizar sustancias nutritivas y realizar la hidrólisis de lípidos (Baskin y Baskin, 2001; Finch-Savage y Leubner-Metzger, 2006), lo que resulta en la producción de plántulas sanas (Ramírez, 2010).

## Conclusiones

La aplicación de 500 ppm de ácido giberélico (AG<sub>3</sub>) a los 15 días después de la siembra es la más efectiva para mejorar la germinación de semillas de *A.*

*potatorum*, por lo que se sugiere utilizarlo en las prácticas de propagación. Una dosis mayor de AG<sub>3</sub> y el uso de micorrizas inhiben la germinación. Las semillas pequeñas tienen mejor respuesta a los tratamientos de germinación con 500 ppm de AG<sub>3</sub>; mientras que el tamaño de las semillas medianas y grandes, no influye en la germinación de esta especie. Los resultados apoyan la conservación *ex situ* y el uso sostenible de *A. potatorum*, ya que constituyen una base sólida para futuras investigaciones y prácticas de propagación.

### **Agradecimientos**

Al Campo Experimental Saltillo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por facilitar las instalaciones para realizar el presente trabajo. A los productores del ejido Guadalupe Victoria, municipio San Miguel Piedras, Nochixtlán, y al Consejo Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal, A. C. de Oaxaca por las facilidades para la obtención del germoplasma.

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

### **Contribución por autor**

Eulalia Edith Villavicencio-Gutiérrez: ejecución, supervisión de la investigación, análisis, interpretación de resultados y redacción del manuscrito; Ma. Alejandra Torres-Tapia: diseño metodológico y revisión del manuscrito; Jorge Méndez



González: análisis estadístico; Carolina Curiel-López: selección y recolección de germoplasma; Félix Sánchez-Pérez: verificación y análisis estadístico de resultados.

## Referencias

- Alcántara C., J. S., J. Acero G., J. D. Alcántara C. y R. M. Sánchez M. 2019. Principales reguladores hormonales y sus interacciones en el crecimiento vegetal. *NOVA* 17(32):109-129. Doi: 10.22490/24629448.3639.
- Angiosperm Phylogeny Group IV. 2016. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society* 181(1):1-20. Doi: 10.1111/boj.12385.
- Association of Official Seed Analysts (AOSA). 1983. *Seed Vigor Testing Handbook*. AOSA. Ithaca, NY, United States of America. 100 p.
- Barrientos R., G., E. L. Esparza I., H. R. Segura P., Ó. Talavera M., M. L. Sampedro R. y E. Hernández C. 2019. Caracterización morfológica de *Agave angustifolia* y su conservación en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 10(3):655-668. Doi: 10.29312/remexca.v10i3.1554.
- Baskin, C. C. and J. M. Baskin. 2001. *Seeds. Ecology, Biogeography, and Evolution of dormancy and germination*. Elsevier. Amsterdam, AMN, Netherlands. 666 p.
- Calderón de Rzedowski, G. y M. T. Germán. 1993. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes. Fascículo 11. Familia Meliaceae. Instituto de Ecología, A. C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). Pátzcuaro, Mich., México. 28 p.
- Constantino, M., R. Gómez-Álvarez, J. D. Álvarez-Solís, J. Pat-Fernández y G. Espín. 2010. Efecto de la biofertilización y los biorreguladores en la germinación y el crecimiento de *Carica papaya* L. *Revista Colombiana de Biotecnología* 12(2):103-115. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3410768>. (14 de septiembre de 2024).

Cruz-Cárdenas, C. I., L. X. Zelaya M., G. Sandoval C., S. de los Santos V., ... y S. Ruiz R. 2021. Utilización de microorganismos para una agricultura sostenible en México: consideraciones y retos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 12(5):899-913. Doi: 10.29312/remexca.v12i5.2905.

Di Sacco, A., M. Way, P. León L., C. I. Suárez B. y J. V. Díaz R. 2020. Manual de recolección, procesamiento y almacenamiento de semillas de plantas silvestres. Royal Botanic Gardens e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Kew, RT, England. 79 p.

Finch-Savage, W. E. and G. Leubner-Metzger. 2006. Seed dormancy and the control of germination. *New Phytologist* 171(3):501-523. Doi: 10.1111/j.1469-8137.2006.01787.x.

García-López, J. I., N. A. Ruiz-Torres, R. H. Lira-Saldívar, I. Vera-Reyes y B. Méndez-Argüello. 2016. Técnicas para evaluar germinación, vigor y calidad fisiológica de semillas sometidas a dosis de nanopartículas. *In: Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). 2º Mini Simposio-Taller Agronotecnología. CIQA. Saltillo, Coah., México. pp. 129-140. <http://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1025/334>. (19 de marzo de 2024).*

García M., A., M. de J. H. Ordóñez D. y M. Á. Briones S. 2004. Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza y World Wildlife Found. Coyoacán, D. F., México. 605 p.

García-Mendoza, A. J. 2010. Revisión taxonómica del complejo *Agave potatorum* Zucc. (Agavaceae): nuevos taxa y neotipificación. *Acta Botánica Mexicana* 91:71-93. Doi: 10.21829/abm91.2010.292.

García-Mendoza, A. J., I. S. Franco M. y D. Sandoval G. 2019. Cuatro especies nuevas de *Agave* (Asparagaceae, Agavoideae) del sur de México. *Acta Botánica Mexicana* 126:e1461. Doi: 10.21829/abm126.2019.1461.

- Gentry, H. S. 1982. *Agaves of Continental North America*. University of Arizona Press. Tucson, AZ, United States of America. 670 p. <https://books.google.com.pe/books?id=TdgUAQAAIAAJ>. (28 de agosto de 2024).
- Gutiérrez-Hernández, G. F., Y. D. Ortiz-Hernández, L. J. Corzo-Ríos y T. Aquino-Bolaños. 2020. Composición química y germinación de semillas de tobalá (*Agave potatorum*). *Interciencia* 45(5):223-228. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33963402007>. (12 de marzo de 2024).
- Ho, T. D., A. Gomez-Cadenas, R. Zentella and J. Casaretto. 2003. Crosstalk between gibberellin and abscisic acid in cereal aleurone. *Journal of plant growth Regulation* 22:185-194. Doi: 10.1007/s00344-003-0026-7.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2018. Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>. (20 de marzo de 2024).
- International Seed Testing Association (ISTA). 2021. Rules Proposals for the International Rules for Seed Testing 2021 Edition. ISTA. Bassersdorf, ZH, Switzerland. 39 p. <https://www.seedtest.org/api/rm/224ZQ538DVP45P7/ogm20-05-rules-proposals-for-ista-2021.pdf>. (20 de agosto de 2024).
- Kaya, M. D. and E. G. Kulan. 2020. Effective seed priming methods improving germination and emergence of sugar beet under low-temperature stress. *Sugar Tech* 22(6):1086-1091. Doi: 10.1007/s12355-020-00848-5.
- Martínez-Ramírez, S., A. Trinidad-Santos, G. Bautista-Sánchez y E. C. Pedro-Santos. 2013. Crecimiento de plántulas de dos especies de mezcal en función del tipo de suelo y nivel de fertilización. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36(4):387-393. Doi: 10.35196/rfm.2013.4.387.
- Morales, I., G. A. Martínez G., C. I. Cortés-Martínez, T. Aquino B., C. Escamirosa T. y M. Hernández T. 2017. Crecimiento de *Agave potatorum* cultivado en ambientes contrastantes y fertirrigación. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 4(2):18-27. <https://www.researchgate.net/profile/Isidro-Morales->

2/publication/325514125\_CRECIMIENTO\_DE\_Agave\_potatorum\_CULTIVADO\_EN\_AMBIENTES\_CONTRASTANTES\_Y\_FERTIRRIGACION/links/5b118f5aa6fdcc4611dbd8f7/CRECIMIENTO-DE-Agave-potatorum-CULTIVADO-EN-AMBIENTES-CONTRASTANTES-Y-FERTIRRIGACION.pdf. (12 de marzo de 2024).

Ortiz-Hernández, Y. D., G. F. Gutiérrez-Hernández, L. J. Corzo-Ríos, E. García-Ramírez and S. H. Martínez-Tomás. 2018. Varietal and germinative characterization of *Agave potatorum* (Asparagaceae) seeds with different origins. *Botanical Sciences* 96(4):628-639. Doi: 10.17129/botsci.1914.

Peña-Valdivia, C. B., A. B. Sánchez-Urdaneta, J. R. Aguirre R., C. Trejo, E. Cárdenas and A. Villegas M. 2006. Temperature and mechanical scarification on seed germination of "maguey" (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck). *Seed Science and Technology* 34(1):47-56. Doi: 10.15258/sst.2006.34.1.06.

Quiñones-Aguilar, E. E., A. C. Montoya-Martínez, G. Rincón-Enriquez, P. Lobit and L. López-Pérez. 2016. Effectiveness of native arbuscular mycorrhizal consortia on the growth of *Agave inaequidens*. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 16(4):1052-1064. Doi: 10.4067/S0718-95162016005000077.

R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing (version 3.5.3). Vienna, W, Austria. R Foundation for Statistical Computing.

Ramírez T., H. M. 2010. Características bioquímico-fisiológicas de la germinación y desarrollo de plantas jóvenes de maguey (*Agave*) y su relación con la especie, temperatura y potencial de agua del sustrato. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Texcoco, Edo. Méx., México. 160 p.

Ramírez T., H. M., R. Niño V., J. R. Aguirre R., J. Flores, J. A. De-Nova V. and R. Jarquín G. 2016. Seed viability and effect of temperature on germination of *Agave angustifolia* subsp. *tequilana* and *A. mapisaga*; two useful *Agave* species. *Genetic Resources and Crop Evolution* 63:881-888. Doi: 10.1007/s10722-015-0291-x.

Rao, N. K., J. Hanson, M. E. Dooloo, K. Ghosh, D. Novell y M. Larinde. 2007. Manual para el manejo de semillas en bancos de germoplasma. Bioversity International. Roma, RM, Italia. 165 p.

Torres, I., A. Casas, E. Vega, M. Martínez-Ramos and A. Delgado-Lemus. 2015. Population dynamics and sustainable management of Mescal Agaves in Central Mexico: *Agave potatorum* in the Tehuacán Cuicatlán Valley. *Economic Botany* 69:26-41. Doi: 10.1007/s12231-014-9295-2.

Trinidad-Cruz, J. R., E. E. Quiñones-Aguilar, L. V. Hernández-Cuevas, L. López-Pérez y G. Rincón-Enríquez. 2017. Hongos micorrízicos arbusculares asociados a la rizosfera de *Agave cupreata* en regiones mezcaleras del estado de Michoacán, México. *Scientia Fungorum* 45:13-25. Doi: 10.33885/sf.2017.0.1164.

Vázquez D., E., J. R. García N., C. B. Peña V., H. M. Ramírez T. y V. Morales R. 2011. Tamaño de semilla, emergencia y desarrollo de la plántula de maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck). *Revista Fitotecnia Mexicana* 34(3):167-173. Doi: 10.35196/rfm.2011.3.167.

Vásquez, W., P. Pupiales, P. Viteri, A. Sotomayor, ... y W. Viera. 2019. Escarificación química y aplicación de ácido giberélico para la germinación de semillas de cultivares de mora (*Rubus glaucus* Benth). *Interciencia* 44(3):161-166. <https://www.redalyc.org/journal/339/33958848009/html/>. (21 de marzo de 2024).



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.