

El desafío para establecer especies arbóreas en suelos salinos del ex lago Texcoco

The challenge to establish tree species in saline soils of the former Texcoco lake

César Ortiz-Torres¹ , Armando Gómez-Guerrero¹ , Héctor Manuel Ortega-Escobar¹ ,
Javier López-Upton¹ , Francisca Ofelia Plascencia-Escalante¹  y Tomás Martínez-Trinidad¹ 

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

‡ Autor para correspondencia (agomezg@colpos.mx)

Editora de Sección: Dra. Verónica Ortega Baranda

RESUMEN

Dado la presión por urbanizar áreas con presencia de suelos salino-sódicos (SSS) alrededor del ex lago de Texcoco, México, es importante encontrar estrategias para arborizarlas. El objetivo del estudio fue determinar la respuesta de cinco especies arbóreas; *Pinus greggii*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite*, *P. leiophylla* y como especie de referencia *Psidium guajava*, establecidas en cepas con un sustrato alternativo (CSA) en SSS. Se realizaron 50 cepas de 1 m de profundidad con 0.60 m de diámetro y se rellenaron con el sustrato alternativo. Se midió el pH, la conductividad eléctrica (CE), la resistencia mecánica, el contenido volumétrico de humedad, el contenido hídrico relativo (CHR) en tejido vegetal y la supervivencia a 280 días. Las CSA presentaron menores valores respecto al testigo (SSS): en pH, 8.99 vs. 9.95; en CE, 2.58 vs. 8.19 dS m⁻¹; en resistencia mecánica, 1.72 vs. 2.53 MPa; y en el contenido volumétrico de humedad, 0.41 vs. 1.06 cm³ cm⁻³. El CHR aumentó a los 120 días en *P. ayacahuite* (de 74.7 a 81.5%) y *P. leiophylla* (75.2 a 77.5%), mientras que en *P. guajava* disminuyó (92.8 a 75.5%). La supervivencia a los 280 días de *P. guajava* (70%) superó a la de los pinos (1.67%). Durante el tiempo de evaluación *P. guajava* se adaptó mejor, mientras que los pinos fueron menos tolerantes. Las CSA podrían ayudar en el establecimiento de especies arbóreas propiciando un entorno saludable a pesar de las condiciones adversas del SSS.

Palabras clave: conductividad eléctrica, pH, *Pinus* spp, *Psidium guajava*, suelo salino-sódico, sustrato.

SUMMARY

Due to high pressure for the urbanization of areas of the saline-sodic soils (SSS) around the former Texcoco lake, State of Mexico, it is important to find strategies for tree planting. The aim of the study was to determine the response of five tree species; *Pinus greggii*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite*, *P. leiophylla* and as reference species *Psidium guajava*, established in holes filled with an alternative substrate (HAS) in SSS. Fifty holes 1 m depth and 0.60 m in diameter were excavated and filled with an alternative substrate. The pH, electrical conductivity (EC), mechanical resistance (MR), volumetric water content, relative water content (RWC) in plant tissue and survival at 280 days were measured. The HAS presented lower values with respect to the control (SSS): in pH, 8.99 vs. 9.95; in EC, 2.58 vs. 8.19 dS m⁻¹; in volumetric water content, 0.41 vs. 1.06 cm³ cm⁻³; and in mechanical resistance, 1.72 vs. 2.53 MPa. The RWC increased at 120 days in *P. ayacahuite* (from 74.7 to 81.5%) and *P. leiophylla* (75.2 to 77.5%), while in *P. guajava* it decreased (92.8 to 75.5%). Survival after 280



Cita recomendada:

Ortiz-Torres, C., Gómez-Guerrero, A., Ortega-Escobar, H. M., López-Upton, J., Plascencia-Escalante, F. O., & Martínez-Trinidad, T. (2023). El desafío para establecer especies arbóreas en suelos salinos del Ex Lago Texcoco. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-14. e1593. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1593>

Recibido: 7 de junio de 2022.
Aceptado: 26 de diciembre de 2022.
Artículo. Volumen 41.
Abril de 2023.

days for *P. guajava* (70%) exceeded that of pines (1.67%). *P. guajava* was the species the better performed, whereas pines did not survived salinity. HAS was helpful in the establishment of tree species by providing healthier environment despite the adverse conditions of the SSS.

Index words: electrical conductivity, pH, *Pinus* spp, *Psidium guajava*, saline-sodic soil, substrate.

INTRODUCCIÓN

Los suelos del ex-lago de Texcoco (ELT) originalmente conformaron el fondo de varios cuerpos de agua salada. El drenado del lago realizado hace varios siglos para evitar inundaciones en la Ciudad de México (Soto-Coloballes, 2020), dejó expuestos suelos con salinidad extrema y desprovistos de vegetación. Actualmente los suelos del ELT están sometidos a una alta presión de uso para vivienda e infraestructura de comunicación por su topografía plana y su cercanía a la Ciudad de México. Las imágenes aéreas de la zona del lago muestran la creciente urbanización que transforma el paisaje. Dada la alta densidad de población se anticipa que la incorporación de esta área requerirá la presencia de vegetación para mejorar la condición ambiental del entorno. No obstante, el establecimiento de árboles es extremadamente difícil por el elevado pH y CE (Dendooven *et al.*, 2010), baja infiltración del suelo (Lopez-Acosta, Espinosa y Barba, 2019), alta retención de formas inorgánicas de nitrógeno (Vega-Jarquín, García, Jablonowski, Luna y Dendooven, 2003) y la heterogeneidad de horizontes derivados de sedimentos con inestabilidad físico-mecánica (Arce *et al.*, 2019; Carranza-Edwards, 2018).

Por su alta alcalinidad y bajo contenido de materia orgánica, los suelos del ELT emiten CO₂, N₂O y N₂ cuando se intenta mejorar su fertilidad mediante la adición de fertilizantes nitrogenados, mientras que la adición de lodos urbanos provoca alta volatilización de NH₃ (Vega-Jarquín *et al.*, 2003; Silva, Guido, Ceballos, Marsch y Dendooven, 2008; Ruiz-Romero *et al.*, 2009; Rojas-Oropeza *et al.*, 2010). Esto hace más complicado el reto del establecimiento de vegetación para lograr un entorno ambientalmente aceptable.

Abundan experiencias para establecer vegetación en los suelos del ELT con el uso de especies exóticas tolerantes a salinidad, como *Casuarina* spp., *Tamarix* spp. y *Eucalyptus* spp. (Ikkonen, García-Calderón, Ibáñez-Huerta, Etchevers-Barra y Krasilnikov, 2018; Soto-Coloballes, 2020). Sin embargo, los suelos del ELT quedarán inmersos en la zona urbana en el corto plazo, por lo que se requerirá el establecimiento de otras especies arbóreas de mejor vista escénica y mayor aceptación por los habitantes.

El propósito de este trabajo fue probar si con el uso de cepas rellenas con enmiendas de suelo era posible el establecimiento de especies forestales en suelos salinos del ELT. Los objetivos del estudio fueron: (1) observar la respuesta de cuatro especies de pino: *Pinus pseudostrobus* Lindl., *P. greggii* Engelm. ex Parl. var. *australis* Donahue & Lopez, *P. ayacahuite* Ehrenb. ex Schltld. y *P. leiophylla* Schiede ex Schltld. & Cham.; y *Psidium guajava* L. como una especie de referencia, establecidas en CSA, y (2) observar los cambios en pH, CE y resistencia mecánica del sustrato utilizado como relleno en las cepas de reforestación después de un año.

MATERIALES Y MÉTODOS

Establecimiento del Experimento

La plantación se estableció en un terreno salino que fue parte del ELT, ubicado dentro del Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, Texcoco, Estado de

México, con elevación de 2237 m de altitud, temperatura media anual de 15.3 °C y precipitación media anual de 644 mm. En febrero de 2019, con la ayuda de un ahoyador de espiral montado sobre un tractor agrícola, se cavaron 60 cepas circulares (Figura 1b y 1e). Las dimensiones de estas fueron de 0.60 × 1 m de diámetro y profundidad, mientras que las cepas testigo comunes se realizaron con dimensiones de 0.4 × 0.4 m respectivamente y se asemejan a las tradicionalmente utilizadas en las reforestaciones (Figura 1c y 1d). La separación entre cepas tratamiento fue de 2.5 m y dispuestas en marco real.

La plantación se realizó en julio del 2019 (Figura 1f) y se aplicaron riegos de auxilio cada cinco días para mantener el suelo a un contenido volumétrico de humedad aproximado de 60%, el cual se verificó con un equipo TDR 300 Fieldscout. Las especies arbóreas que se utilizaron fueron *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *australis* Donahue & Lopez, *P. pseudostrobus* Lindl. y *P. ayacahuite* Ehrenb. ex Schltldl. de dos años; *P. leiophylla* Schiede ex Schltldl. & Cham. y *Psidium guajava* L. de tres años. *P. guajava* se incluyó como especie de referencia por ser un árbol frutícola que tolera niveles más altos de salinidad (Qadir et al., 2008). Las especies de pino se seleccionaron debido a que previamente se tenía la experiencia de haberlas establecido en áreas aledañas con menores valores de pH y CE. Mientras que, la edad de las especies varió debido a la disponibilidad de la planta en vivero. Se utilizaron 15 árboles de cada especie, de los cuales 10 se establecieron en cepas con sustrato alternativo (CSA) y cinco se plantaron directamente en el suelo salino sódico (SSS), en cepas testigos. Cada especie se distribuyó en una línea, las cuales se orientaron de tal forma que captaran la mayor variabilidad espacial del terreno, de acuerdo con mediciones preliminares de pH y CE (Figura 2).

El sustrato alternativo con la que se llenaron las cepas tratamiento, consistió en una mezcla de suelo agrícola, tezontle y estiércol composteado de ovinos en una proporción 50-25-25 (Figura 1a), se utilizaron aproximadamente 336 kg de sustrato para rellenar las cepas y presentó un $\text{pH}_{1.5}$ de 8.7 y una $\text{CE}_{1.5}$ de 7.7 dS m^{-1} . El método del composteo consistió en un apilado en forma de bordo de 80 cm de altura y 15 m de largo, regado y volteando la pila cada 15 días. En las cepas testigo no se aplicó enmienda de suelo y se rellenaron con el mismo suelo salino excavado.



Figura 1. Panorama del trabajo de campo. a) preparación del sustrato, b) perforación de cepas profundas con ahoyador, c) cepa profunda perforada, d) cepa testigo, e) cepas perforadas, f) plantas establecidas.
Figure 1. Overview of the field work. a) substrate preparation, b) drilling holes with deep auger, c) view of a drilled hole, d) control treatment hole, e) drilled holes, f) planted trees.

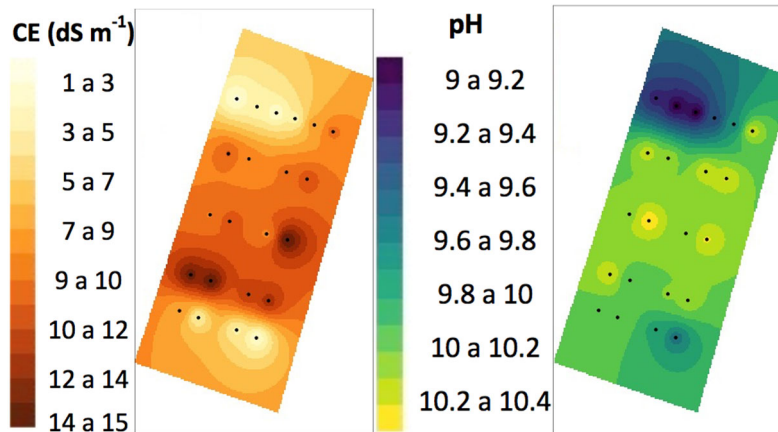


Figura 2. Variabilidad espacial inicial de pH y CE en la parcela de estudio. Los contornos de cada variable se interpolaron con el método de la distancia inversa ponderada. Las imágenes se reprodujeron con la librería gstat del paquete R (R Core Team, 2020).

Figure 2. Initial spatial variability of pH and EC in the study plot. Contour of each variable were interpolated with the inverse distance weighted method. The images were reproduced with the gstat library of software R (R Core Team, 2020).

Muestreo de Suelo y Sustrato

Para describir las características edáficas iniciales del sitio se realizaron tres muestreos a cada 15 m en un transecto de 30 m. En cada muestreo se obtuvieron tres muestras de 0 - 0.10, 0.10 - 0.20 y 0.20 - 0.30 m de profundidad, en las que se analizó pH, CE, cationes y aniones en extracto de saturación (Cuadro 1) y en relación 1:5. Se determinó una alta presencia de Na^+ y Cl^- en la parte central del terreno.

También se realizaron 22 muestreos de forma sistemática en marco real en el SSS donde se establecieron las cepas testigo y de las 50 CSA. En ambos casos las muestras fueron tomadas en los primeros 15 cm. Las muestras fueron secadas al aire en invernadero, se fragmentaron los agregados y se tamizaron a 2 mm. La medición del pH y CE se realizó con un medidor Hanna HI 255 utilizando una proporción suelo solución⁻¹ de 1:5. El pH se evaluó en tres tiempos: 100, 210 y 280 días. La CE se evaluó a los 100 y 280 días.

Medición de Contenido de Humedad Relativa (CHR) en Tejido Vegetal y Supervivencia

El CHR se registró a los 90 y 120 días adaptando la metodología propuesta por Lugojan y Ciulca (2011). Se tomaron cuatro muestras de acículas vigorosas de 2.54 cm de largo para los pinos, considerando que estuvieran expuestas a la luz del sol. Para *P. guajava* se obtuvieron muestras circulares de 0.5 cm de diámetro de las hojas con una perforadora de oficina. Las muestras se colocaron en viales de plástico y se transportaron inmediatamente al laboratorio para minimizar las pérdidas de agua por evapotranspiración; se pesaron en una ultra micro balanza de alta precisión (Sartorius® Mod. SE2) para obtener el peso fresco (Pf). Posteriormente en el mismo vial cada muestra se sumergió en agua destilada durante 72 h para después determinar el peso turgente (Pt). Después, las muestras se secaron en una estufa a 70 °C hasta alcanzar peso constante y se volvieron a pesar en la micro-balanza para obtener el peso seco (Ps). Finalmente, el CHR se calculó con la fórmula:

$$\text{CHR} = ((\text{Pf} - \text{Ps}) * 100) / (\text{Pt} - \text{Ps}). \quad (1)$$

Cuadro 1. Características químicas del sitio (valores medidos del extracto de saturación).
Table 1. Site chemical properties (values measured in saturated extracts).

| Pto. | Prof. | pH | CE | Cationes | | | | Total | Aniones | | | | Total |
|------|-------|------|--------------------|--|------------------|-----------------|----------------|--------|--|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|--------|
| | | | | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Na ⁺ | K ⁺ | | CO ₃ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ | Cl ⁻ | SO ₄ ²⁻ | |
| | cm | | dS m ⁻¹ | g·100 g ⁻¹ _{suelo} | | | | | g·100 g ⁻¹ _{suelo} | | | | |
| 1 | 0-10 | 8.3 | 3.46 | 0.0041 | 0.0045 | 0.0599 | 0.0063 | 0.0747 | 0.0007 | 0.0134 | 0.0212 | 0.0069 | 0.0423 |
| | 10-20 | 9.2 | 4.53 | 0.0026 | 0.0013 | 0.0838 | 0.0060 | 0.0936 | 0.0024 | 0.0151 | 0.0240 | 0.0121 | 0.0536 |
| | 20-30 | 9.7 | 7.52 | 0.0021 | 0.0009 | 0.1464 | 0.0083 | 0.1576 | 0.0044 | 0.0244 | 0.0420 | 0.0204 | 0.0912 |
| 2 | 0-10 | 10.8 | 85.30 | 0.0025 | 0.0019 | 2.5559 | 0.1087 | 2.6690 | 0.3178 | 0.1505 | 1.1635 | 0.3674 | 1.9991 |
| | 10-20 | 10.7 | 37.40 | 0.0011 | 0.0018 | 0.8124 | 0.0375 | 0.8528 | 0.0641 | 0.0416 | 0.4278 | 0.0824 | 0.6158 |
| | 20-30 | 10.6 | 40.90 | 0.0010 | 0.0005 | 1.1203 | 0.0504 | 1.1721 | 0.0627 | 0.0528 | 0.5420 | 0.1145 | 0.7720 |
| 3 | 0-10 | 9.2 | 3.77 | 0.0029 | 0.0079 | 0.1048 | 0.0060 | 0.1215 | 0.0047 | 0.0237 | 0.0187 | 0.0074 | 0.0545 |
| | 10-20 | 9.6 | 5.62 | 0.0022 | 0.0047 | 0.1420 | 0.0064 | 0.1553 | 0.0079 | 0.0324 | 0.0196 | 0.0311 | 0.0910 |
| | 20-30 | 10.1 | 9.93 | 0.0006 | 0.0061 | 0.2439 | 0.0101 | 0.2607 | 0.0144 | 0.0319 | 0.0296 | 0.0870 | 0.1629 |

La supervivencia de las especies se monitoreó cada semana y se consideró planta muerta cuando más del 90% del follaje de los pinos presentó alguna lesión necrótica. En *P. guajava* debido a su característica de especie semi-caducifolia, se registraron como vivas aquellas que mantuvieran sus hojas o mostraran algún rebrote de hojas en el tallo.

Diseño y Análisis Estadístico del Experimento

El diseño experimental se distribuyó como un arreglo en bloques al azar, definiendo como bloques las especies arbóreas y en cada bloque se tuvieron 10 repeticiones de CSA y cinco repeticiones por bloque en SSS, el árbol fue la unidad experimental resultando un total de 75 unidades.

Después de 280 días de observación, eventualmente todas las especies de pino murieron, aunque a diferente tasa y *P. guajava* sobrevivió en un 70%. Debido a esto el análisis estadístico se redujo a una comparación con pruebas de *t* y Mann-Whitney (dependiendo de la presencia de normalidad en los datos), cuando solo se comparó el SSS vs. CSA. Así también, dado que en todas las variables evaluadas los valores de SSS siempre fueron mayores respecto a CSA y mostraron una alta variabilidad, se realizaron comparaciones por Tukey y Dunn (dependiendo de la presencia de normalidad en los datos) solo entre los bloques de CSA y los valores de turgencia del tejido de follaje medido como contenido hídrico relativo (CHR).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de las CSA respecto al SSS

En general, todas las variables mostraron valores significativamente menores ($P < 0.05$) en las CSA respecto al SSS (Cuadro 2). Llama la atención el alto contenido volumétrico de humedad del suelo SSS comparado con CSA ($P < 0.05$) lo que podría explicarse por la elevada concentración de sales (Cuadro 2). Los elevados valores de CE en el SSS ocasionaron una sobreestimación de los valores de humedad volumétrica registrados con el TDR (Inoue, Ahmed, Saito y Irshad, 2008). Los pulsos generados por las varillas del TDR para la medición del CVH, están relacionados con las propiedades dieléctricas del suelo, debido a que los dipolos de las moléculas

Cuadro 2. Medidas de valor promedio y desviación estándar de todas las cepas (SSS y CSA) durante todo el tiempo de experimentación.**Table 2. Average and standard deviation measurements of all holes (SSS and CSA) throughout the experimentation period.**

| Condición | RM * | CVH ** | pH ** | CE _{1:5} ** |
|-----------|---------------|----------------------------------|---------------|----------------------|
| | MPa | cm ³ cm ⁻³ | | dS m ⁻¹ |
| SSS | 2.53 ± 0.81 a | 1.06 ± 0.07 a | 9.95 ± 0.42 a | 9.19 ± 5.03 a |
| CSA | 1.72 ± 0.71 b | 0.41 ± 0.14 b | 8.99 ± 0.17 b | 2.43 ± 0.41 b |

RM = resistencia mecánica; CVH = contenido volumétrico de humedad. *Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, prueba de t ($P < 0.05$). **Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, prueba de Mann-Whitney ($P < 0.05$).

RM = mechanical resistance; CVH = volumetric water content. *Different letters in the same column indicate significant differences, t-test ($P < 0.05$). **Different letters in the same column indicate significant differences, Mann-Whitney test ($P < 0.05$).

de agua ralentizan la propagación de la señal y al ser un instrumento de tipo reflectómetro de contenido de agua, presenta sensibilidad a la temperatura (Benor, Levy, Mishael y Nadler, 2013) y a las características del suelo como: la textura, estructura y densidad del suelo (Tan, Wu, Huang, Wu y Zeng, 2017). De esta forma, la sobreestimación del CVH en el SSS se debe también a las características mismas del sitio: su origen lacustre, presencia de arcillas con más del 30% y además de un hidromorfismo moderado (Luna-Guido *et al.*, 2000; Segura-Castruita, Gutiérrez, Ortíz, y Gómez, 2000).

Por otro lado, la materia orgánica contenida en CSA favoreció una menor resistencia mecánica ($P < 0.05$), (Cuadro 2). Además de disminuir la resistencia mecánica a la penetrabilidad, el uso de esta enmienda ayuda a mejorar la distribución de macro y microporos, retener mayor humedad (Zhang, Horn y Hallet, 2005), favorecer la infiltración y mejorar la efectividad de los riegos promoviendo el lavado de sales. A pesar de que la aplicación constante de riegos ayuda a disminuir la salinidad del suelo en la parte superficial, estas sales tienden a acumularse en las capas más profundas y en el caso de dejar de aplicar los riegos, las sales volverían a acumularse en la superficie por procesos de evapotranspiración del suelo y ascenso por capilaridad (Zouari *et al.*, 2019) El pH fue significativamente menor ($P < 0.05$) en CSA (8.99 ± 0.17), manteniendo la condición de alcalinidad en ambos casos.

pH en CSA

Debido a que el promedio del pH y la CE de las CSA en todos los bloques fue menor al SSS ($P < 0.05$), se realizaron comparaciones de medias solo entre las CSA con diferentes especies. La variación promedio del pH (0.42) y la CE (4.28 dS m^{-1}) en el SSS fue alta en los 280 días. El Cuadro 3 muestra que a los 100 y 210 días el pH de las CSA tuvieron menor variación (de 9 a 9.3) y se mantuvo por debajo de los niveles del SSS. A los 280 días el pH en las CSA también fue menor respecto al promedio del SSS en ese mismo periodo y se encontró una mayor variación en los valores de las CSA como en SSS (Cuadro 3). El pH en las CSA mostró una disminución como consecuencia de la materia orgánica presente en el sustrato (Li-Ping *et al.*, 2015; Segura-Castruita *et al.*, 2000), a través de su descomposición y producción de ácidos orgánicos debido a la actividad microbiana presente en la fracción lábil (Tarchouna, Merdy, Raynaud, Pfeifer y Lucas, 2010). Sin embargo, los valores aún se encontraron dentro del rango fuertemente salino (Ditzler, Scheffe y Monger, 2017).

Los mayores niveles de pH encontrados en las CSA en los primeros 210 días podrían estar explicados por el agua de lluvia que contaminó las cepas con las diferentes sales presentes en el SSS del lugar y que a su vez propicio su lixiviación. El lavado de sales realizado por las lluvias y los riegos semanales, probablemente

Cuadro 3. pH y CE en CSA por cada bloque (especies de pino) y en SSS.
Table 3. pH and CE in CSA for each block (pine species) and in SSS.

| Sitio | pH | | | CE | |
|-------------------------|--------------------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| | 100 días * | 210 días** | 280 días** | 100 días ** | 280 días ** |
| | dS m ⁻¹ | | | | |
| SSS | 10.1 ± 0.34 | 10.2 ± 0.45 | 9.6 ± 0.56 | 7.42 ± 4.15 | 9.19 ± 4.86 |
| <i>P. ayacahuite</i> | 9.1 ± 0.12 a | 9.3 ± 0.14 a | 8.5 ± 0.50 c | 3.16 ± 0.35 a | 2.17 ± 0.20 a |
| <i>P. leiophylla</i> | 9.2 ± 0.10 a | 9.2 ± 0.06 a | 8.9 ± 0.16 ab | 3.00 ± 0.53 ab | 2.47 ± 0.21 a |
| <i>P. pseudostrabus</i> | 9.2 ± 0.13 a | 9.1 ± 0.19 ab | 9.0 ± 0.19 a | 2.59 ± 0.83 ab | 2.28 ± 0.42 a |
| <i>P. greggii</i> | 9.1 ± 0.13 a | 9.1 ± 0.06 ab | 9.1 ± 0.27 a | 2.40 ± 0.34 bc | 2.54 ± 0.45 a |
| <i>P. guajava</i> | 9.1 ± 0.14 a | 9.0 ± 0.10 b | 8.5 ± 0.18 cb | 1.88 ± 0.28 c | 2.72 ± 0.55 a |

*Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, Dunn ($P < 0.05$). **Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, Tukey ($P < 0.05$).

*Different letters in the same column indicate significant differences, Dunn ($P < 0.05$). **Different letters in the same column indicate significant differences, Tukey ($P < 0.05$).

ayudaron a disminuir su concentración en la solución suelo de la capa superficial, sin embargo, dio lugar a que parte del sodio intercambiable se hidrolizara formando hidróxido de sodio, o se formara carbonato de sodio, generando un aumento en el pH del sustrato así como la dispersión de partículas del suelo salino sódico (Richards, 1954). A pesar de que las lluvias y los riegos ayudan en el lavado de sales, se ha encontrado que estas prácticas también tienden a aumentar el pH cuando hay transporte superficial de suelo (Yu *et al.*, 2010; Yin *et al.*, 2022). Estos procesos crearon un ambiente desfavorable para la entrada de agua en la parte superficial de las cepas ya que los SSS en épocas de lluvias generaban material fino, producto de la dispersión de partículas del suelo, que eran arrastradas hacia las cepas, se cementaban y posteriormente impedían el proceso de lixiviación hasta que se realizaba una práctica de roturación de la parte superficial. Por otro lado, a los 280 días los niveles de pH en las CSA tuvieron mayor variación y menores niveles respecto a los primeros 210 días. Esto se debe a que las lluvias ya habían cesado, y con ello cesó el aporte de agua con sales hacia las cepas; además, los riegos de apoyo promovieron la lixiviación mitigando el efecto de las sales.

CE en CSA

La CE promedio en CSA (< 3.16 dS m⁻¹) fue menor ($P < 0.05$) que en SSS durante los 280 días. En los primeros 100 días, los riegos solo se mantuvieron en las CSA que tenían árboles vivos lo que permitió la lixiviación continua de sales, mientras que, en aquellas donde ya no había árboles el riego no fue aplicado y la salinidad aumentó. Esto se presentó en las CSA de los *P. pseudostrabus* (especie que sobrevivió por menos tiempo) las cuales tuvieron altos niveles de CE a los 100 días como consecuencia de ser regadas por menor tiempo debido a que ya no había árboles que regar (Cuadro 3). A partir de estos resultados los riegos programados se aplicaron en las CSA ya sea que tuvieran árboles o no con la finalidad de no incrementar la variabilidad estadística en los bloques de acuerdo con los resultados obtenidos de los análisis de suelos. La CE en las CSA a los 280 días fue menor que a los 100 días y con menor variabilidad, lo cual puede ser efecto de los riegos de apoyo que permitieron el lavado de sales. Estudios demuestran que la aplicación de riegos en suelos salino sódicos ayudan en el lavado de las sales aún utilizando aguas salobres, pero en mayor proporción (Yin *et al.*, 2022).

Durante los 280 días del experimento el SSS presentó alta variabilidad en la CE con niveles desde 1.6 hasta 17.22 dS m⁻¹. Esta variación espacial y temporal es consecuencia de la disminución de la humedad en el suelo y la alta evapotranspiración (de Vos *et al.*, 2016; Tomar y Gupta, 1985). En los suelos del ELT la evaporación potencial supera en aproximadamente tres veces los 550 mm de precipitación (Rojas-Oropeza *et al.*, 2010). Esta desproporción en el balance hídrico influye en la supervivencia y desarrollo de los árboles, y se suma a otros factores que impiden su establecimiento en condiciones de estrés salino. Algunos pueden ser: su establecimiento en áreas con escasa cobertura vegetal, con exposición a altas temperaturas, presencia de suelos alcalinos y por consecuencia el desequilibrio nutrimental de la planta (Torres-Rojo, 2021). En sitios con características ambientales similares (2000 mm año⁻¹ de evapotranspiración, altas concentraciones de carbonatos y cloruros de sodio en el suelo), se ha encontrado que la concentración de sales puede variar de 0.78 - 10.02 dS m⁻¹, dificultando el desarrollo y supervivencia de árboles utilizados para rehabilitación (Oba *et al.*, 2001).

Los riegos de auxilio y la precipitación mitigaron en parte los efectos de las sales. Sin embargo, el exceso de arcillas, carbonatos y sodio provenientes del SSS que eran arrastrados por las lluvias, creaban una costra en la parte superficial e impedían la infiltración del agua a partes más profundas (Gupta *et al.*, 2008; Kovda, Yaron, Shalhevet, Szaboles y Darab, 1973), afectando así, las propiedades físicas y principalmente la conductividad hidráulica del suelo (Suarez, Wood y Lesch, 2006). Esto provocaba una acumulación de sales en la zona radical que perjudicaba el desarrollo de las raíces de los árboles (Akeroyd, Tyerman, Walker y Jolly, 1998; Sánchez-Bernal *et al.*, 2020), por lo cual se tenían que realizar prácticas de laboreo en las CSA para romper la parte sellada y mejorar la estructura.

Contenido Hídrico Relativo

El CHR de las cinco especies estudiadas se determinó a los 60 días y a los 120 días. En esta última fecha sólo se evaluaron *P. guajava*, *P. ayacahuite* y *P. leiophylla*, ya que *P. greggii* y *P. pseudostrobus* no sobrevivieron (Cuadro 4). Al momento de ser evaluadas las diferentes especies de pino, el CHR de sus acículas se encontraba dentro de un límite promedio mínimo de hidratación ($\leq 76\%$) (Fan, Blake y Blumwald, 1994; Wang *et al.*, 2012). Se ha encontrado que en distintas especies de pino sin estrés salino (*Pinus bungeana* Zucc. ex Endl. y *P. banksiana* Lamb) cuando su CHR es $< 75\%$ sus acículas comienzan a tener fuga de electrolitos, disminuye su contenido de clorofila, pierden turgencia y la planta comienza a realizar un ajuste osmótico que le permite tolerar la deshidratación y ajustarse a condiciones de estrés por sequía (Fan *et al.*, 1994; Wang *et al.*, 2012).

En *P. guajava* el CHR que presentó a los 60 días fue el más elevado de todas las especies (Cuadro 4) mientras que a los 120 días disminuyó un 18.6% respecto al inicio. El alto CHR registrado a los 60 días puede deberse tanto a las condiciones ambientales dada a la alta disponibilidad de agua por los riegos y las lluvias, como por un ajuste interno para hacer frente a la presencia de sales. Se ha encontrado que el contenido hídrico en hojas de *P. guajava* y *Tamarindus indica* L. tiende a incrementarse como una respuesta al aumento de NaCl en sus hojas (Gebauer, El-Sidding, Salih y Ebert, 2004; Rai, Jaiswal y Jaiswal, 2010). Así como, contribuir en la disminución del potencial osmótico de las hojas, permitiéndole a la planta mantener la turgencia celular mediante la continua absorción de agua (Mbarki *et al.*, 2018).

Por otro lado, la disminución del CHR a los 120 días responde a los factores de estrés que estuvieron presentes durante ese tiempo (disminución de la temperatura, de la precipitación y presencia de granizadas). En algunas especies caducifolias se ha encontrado que después de aplicar un estrés hídrico en plantas el CHR tiende a disminuir: *Cordia dodecandra* A.DC. pasa de 71.6 a 26.1%; *Piscidia piscipula* (L. Sarg.) de 68.74 a 19.44%; y, *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit de 56.9 a 11.9%

Cuadro 4. Contenido hídrico relativo por especie en distintas temporadas.
Table 4. Relative water content by species in different seasons.

| Especie | CHR | |
|-------------------------|---------------|---------------|
| | 60 días ** | 120 días ** |
| | ----- % ----- | |
| <i>P. greggii</i> | 75.1 ± 3.96 b | - |
| <i>P. pseudostrabus</i> | 71.7 ± 4.51 b | - |
| <i>P. ayacahuite</i> | 74.7 ± 2.63 b | 81.5 ± 4.24 a |
| <i>P. leiophylla</i> | 75.2 ± 5.04 b | 77.5 ± 1.11 a |
| <i>P. guajava</i> | 92.8 ± 2.06 a | 75.5 ± 3.50 a |

**Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, Tukey ($P < .05$).

** Different letters in the same column indicate significant differences, Tukey ($P < 0.05$).

(Luna-Flores, Estrada, Jiménez y Pinzón, 2012). Así también, en especies como *Schinus terebinthifolius* Raddi, *Ehretia latifolia* Loisel. y *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh. el CHR varía con las condiciones ambientales presentando CHR < 70% cuando las temperaturas son altas (26 °C) y las precipitaciones bajas (1.5 mm), mientras que cuando las condiciones ambientales son contrarias el CHR > 85% (Pimienta-Barrios, Robles y Martínez, 2012). En otros estudios donde se han incrementado las concentraciones salinas de 4 a 12 dS m⁻¹ en plántulas de *Melia dubia* Cav., el CHR disminuyó, así como el contenido de clorofila, la tasa de fotosíntesis, la concentración interna de CO₂ y la transpiración, indicando que el estrés salino induce cambios en los procesos fisiológicos de la planta (Kumar, Banyal, Singh, Yadav y Sharma, 2021)

Supervivencia

Después de 280 días de establecer la plantación, de todos los pinos, solo un árbol de *P. pseudostrabus* en SSS sobrevivió. Resultados similares fueron encontrados al establecer *Pinus halepensis* en suelos salinos con pH de 8.4, en donde el 100% de las plantas murieron debido a que no toleraron las condiciones de alcalinidad moderada (Zouari et al., 2019). A pesar de que el género *Pinus* es poco tolerante a condiciones de alcalinidad, se ha encontrado que existen especies de este género que pueden sobrevivir en condiciones de baja alcalinidad, por ejemplo, *P. pseudostrabus* (Sigala-Rodríguez, González y Jiménez, 2015) y *P. greggii* Engelmann ex Parlatores var. *australis* (Reyes-Esteves, López, Velasco y Jiménez, 2022)

Los pinos que toleraron por más tiempo la salinidad fueron *P. leiophylla* y *P. ayacahuite*, el inicio de su mortandad en cepas con sustrato se registró a los 112 y 126 días, mientras que en condiciones directas de SSS, la supervivencia de *P. leiophylla* se prolongó por más tiempo (133 días) que *P. ayacahuite* (35 días) (Figura 3). Se ha encontrado que en condiciones de invernadero *P. leiophylla* llega a tolerar concentraciones de hasta 150 mM de NaCl reduciendo significativamente su biomasa radical y, a su vez, desarrolla nuevos rebrotes en la parte baja del tallo (Jimenez-Casas y Zwiazek, 2013), lo cual fue observado en la parte baja y media de las plantas. Niveles similares de tolerancia se han encontrado en *Pinus silvestris* L. que llega a tolerar hasta 117.5 mM de NaCl (Rzepka-Plevneš, Kulpa y Charkot, 2006).

El inicio de muerte de planta para *P. greggii* y de *P. pseudostrabus* en CSA y SSS ocurrió en el día 35 del experimento. La supervivencia en *P. greggii* fue de 0% mientras que en *P. pseudostrabus* fue de 6% (solo una de 15). La súbita y baja supervivencia de estas especies reflejó su sensibilidad a partir de pH > 9. Esta condición de alcalinidad permanente en la solución suelo de la zona radical, generó el amarillamiento de las acículas debido a la baja disponibilidad de Fe para las

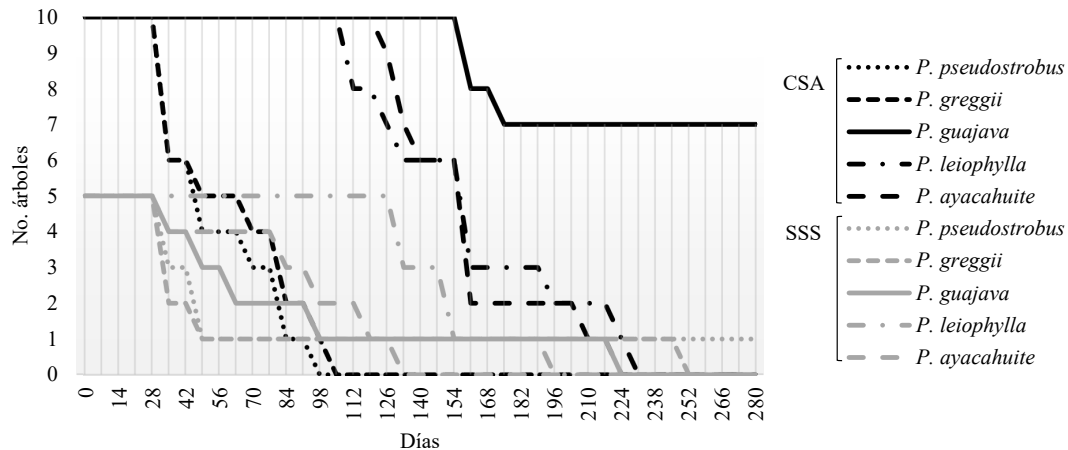


Figura 3. Supervivencia de las especies en CSA y en SSS.
Figure 3. Species survival in CSA and SSS.

plantas (López-López y Estañol-Botello, 2007). En todos los pinos estuvo presente esta condición, sin embargo, en *P. pseudostrobus* y *P. greggii* se presentó de forma más acentuada y continuó con la necrosis de la punta de las acículas hasta llegar a la parte del tallo. El comportamiento de *P. pseudostrobus* en el gradiente salino más bajo ($\text{pH} = 8.45$ y $\text{CE} = 2.22 \text{ dS m}^{-1}$) puede indicar una máxima tolerancia a tales condiciones a través de la reasignación de nutrientes a partes esenciales de la planta para su supervivencia (Landis, 2005). Así también, se ha encontrado que esta especie ha logrado establecerse en $\text{pH} = 7.8$, $\text{CE} = 0.121 \text{ dS m}^{-1}$ y tener una supervivencia de 52.9% (Sigala-Rodríguez et al, 2015).

Hasta los 280 días *P. guajava* tuvo 70% de supervivencia, la mayor de todas las especies evaluadas (Figura 3). Resultados similares se han encontrado en reforestaciones de Kenia con suelos salino-sódicos ($\text{pH} = 7.5 - 8.4$, $\text{CE} = 0.78 - 10.02 \text{ dS m}^{-1}$, y altas concentraciones de NaCl, Ca y carbonatos), donde la supervivencia de *Acacia nilotica* (L.) Delile fue de 78.1%, *Cordia sinensis* Lam. 60.3%, *Dobera glabra* (Forssk.) Juss. ex Poir. 66.6% y *Salvadora persica* L. 75.8% (Oba et al., 2001). Mientras que en suelos similares pero en India las especies que presentaron los mayores porcentajes de supervivencia fueron *Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth. con 63%, *A. nilotica* 71%, *Casuarina equisetifolia* L. 69% y *Tamarix articulata* Vahl. 81% (Tomar y Gupta, 1985).

La supervivencia de *P. guajava* puede deberse a la capacidad de desarrollar una tolerancia osmótica que le permite absorber iones del medio y acumular solutos orgánicos en sus tejidos (Läuchli y Grattan, 2012). En *P. guajava* y *T. indica* se ha reportado que después de ser tratadas con soluciones de NaCl, todos sus tejidos tienden a acumular Na^+ y Cl^- (Gebauer et al., 2004; Rai et al., 2010) y sus niveles de prolina aumentan desarrollando un ajuste osmótico que les permite tolerar la salinidad (Woodward y Bennett, 2005; Rai et al., 2010).

Otro factor que pudo haber ayudado en la supervivencia de *P. guajava*, *P. leiophylla* y *P. ayacahuite* por más tiempo fue la presencia de la materia orgánica presente en el estiércol de bovino aplicado en el sustrato. Esto generó condiciones favorables al inicio para que las raíces se establecieran, y aunque con el tiempo el sustrato adquirió características similares a su medio circundante, la materia orgánica ayudó a disminuir la acumulación de Na^+ en las raíces, permitiendo tolerar por más tiempo la condición de estrés en las raíces. Li-Ping et al. (2015) encontraron que enmiendas con estiércol aplicadas en suelos salinos disminuyeron la acumulación de sodio en las raíces de *Salicornia europea* L. e incrementaron el contenido de K^+ tanto en las raíces como en el tallo.

CONCLUSIONES

Aunque las especies de pino no lograron subsistir, este trabajo demuestra que existe cierto potencial de lograr el establecimiento de especies de árboles tolerantes a condiciones de suelos extremadamente salinos del ex lago de Texcoco, mediante el relleno de cepas con suelo mejorado. El hecho de que el sustrato mejorado dentro de las cepas haya mitigado el pH, la CE y la resistencia mecánica después de un año abre la posibilidad de seguir explorando la viabilidad del establecimiento de árboles con experimentos similares. Particularmente, la resistencia que mostró *P. guajava*, sugiere que mediante el uso de cepas profundas con sustrato alternativo se pueda lograr el establecimiento de especies frutícolas para fomentar la presencia de fauna e incrementar a la vez el valor sociocultural de los suelos de este ex lago. El área del ex lago de Texcoco puede transformarse en un área verde importante que provea servicios ecosistémicos como la regulación de clima, promoción de aire más limpio y de vista escénica aceptable por la comunidad.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses en competencia.

FONDOS

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Redacción del manuscrito, trabajo de campo y laboratorio, análisis y procesamiento de datos: C.O.T. Planeamiento, dirección de la investigación, revisión de datos y del manuscrito: A.G.G. Revisión de datos y del manuscrito: H.M.O.E. Asesoramiento en el diseño de la investigación y revisión del manuscrito: J.L.U. Seguimiento del proyecto y revisión del manuscrito: F.O.P.E.Y., y T. M. T.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca de apoyo académico al primer autor y al Colegio de Postgraduados Campus Montecillo por las facilidades para el establecimiento de la plantación.

LITERATURA CITADA

Akeroyd, M. D., Tyerman, S. D., Walker, G. R., & Jolly, I. D. (1998). Impact of flooding on the water use of semi-arid riparian eucalypts. *Journal of Hydrology*, 206(1-2), 104-117. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00092-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00092-4)

- Arce, J. L., Layer, P. W., Macías, J. L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F. J., ... Vásquez-Serrano, A. (2019). Geology and stratigraphy of the Mexico basin (Mexico City), central trans-mexican volcanic belt. *Journal of Maps*, 15(2), 320-332. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1593251>
- Benor, M., Levy, G. J., Mishael, Y., & Nadler, A. (2013). Salinity effects on the fieldscout TDR 300 soil moisture meter readings. *Soil Science Society of America Journal*, 77(2), 412-416. <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0294n>
- Carranza-Edwards, A. (2018). Lithological correlation of Texcoco lake subsoil. *Hidrobiologica*, 28(1), 93-101. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2018v28n1/carranza>
- de Vos, A., Bruning, B., Van Straten, G., Oosterbaan, R., Rozema, J., & Van Bodegom, P. (2016). *Crop salt tolerance under controlled field conditions in The Netherlands, based on trials conducted at Salt Farm Texel*. Den Burg, The Netherlands: Salt Farm Texel.
- Dendooven, L., Alcántara-Hernández, R. J., Valenzuela-Encinas, C., Luna-Guido, M., Perez-Guevara, F., & Marsch, R. (2010). Dynamics of carbon and nitrogen in an extreme alkaline saline soil: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(6), 865-877. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.02.014>
- Ditzler, C., Scheffe, K., & Monger, H. C. (2017). *Soil survey manual*. Washington, DC, USA: USDA.
- Fan, S., Blake, T. J., & Blumwald, E. (1994). The relative contribution of elastic and osmotic adjustments to turgor maintenance of woody species. *Physiologia Plantarum*, 90(2), 408-413. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1994.tb00406.x>
- Gebauer, J., El-Siddig, K., Salih, A. A., & Ebert, G. (2004). *Tamarindus indica* L. seedlings are moderately salt tolerant when exposed to NaCl-induced salinity. *Scientia Horticulturae*, 103(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.04.022>
- Gupta, R. K., Abrol, I. P., Finkl, C. W., Kirkham, M. B., Arbestain, M. C., Macías, F., ... Arshad, M. A. (2008). Soil salinity and salinization. In W. Chesworth (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science* (pp. 699-704). Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_552
- Ikkonen, E. N., García-Calderón, N. E., Ibáñez-Huerta, A., Etchevers-Barra, J. D., & Krasilnikov, P. V. (2018). Seasonal dynamics of soil CO₂ concentration and CO₂ fluxes from the soil of the former lake Texcoco, Mexico. *Eurasian Soil Science*, 51(6), 674-681. <https://doi.org/10.1134/S106422931806008X>
- Inoue, M., Ahmed, B. O., Saito, T., & Irshad, M. (2008). Comparison of twelve dielectric moisture probes for soil water measurement under saline conditions. *American Journal of Environmental Sciences*, 4(4), 367-372.
- Jimenez-Casas, M., & Zwiazek, J. J. (2013). Effects of branch pruning and seedling size on total transpiration and tissue Na and Cl accumulation in *Pinus leiophylla* seedlings exposed to salinity. *Forest Science*, 59(4), 407-415. <https://doi.org/10.5849/forsci.11-117>
- Kovda, V. A., Yaron, B., Shalhevet, Y., Szaboles, I., & Darab, K. (1973). Quality of irrigation water. En V. A. Kovda, C. V. D. Berg, & R. M. Hagan (Eds.), *Irrigation, drainage and salinity* (pp. 177-205). Fitzroy Square, London, England: FAO-UNESCO-HUTCHINSON & CO. ISBN: 0091022606
- Kumar, R., Banyal, R., Singh, A., Yadav, R. K., & Sharma, P. C. (2021). Salinity stress effects on the growth, morphological, physiological, and biochemical properties of *Melia (Melia dubia* Cav.) plant. *Dendrobology*, 86, 56-68. <https://doi.org/10.12657/denbio.086.006>
- Landis, T. D. (2005). Top pruning. In R. K. Dumroese, T. D. Landis, & R. Watson (Eds.), *Forest nursery notes*. Números R6-CP-TP-06-2005 (pp. 13-16). Portland, OR, USA: USDA Forest Service-Pacific Northwest Region-State and Private Forestry-Cooperative Programs.
- Läuchli, A., & Grattan, S. R. (2012). Plant responses to saline and sodic conditions. En W. W. Wallender & K. K. Tanji (Eds.), *Agricultural salinity assessment and management* (pp. 169-205). New York, NY, USA: American Society of Civil Engineers-Environmental Water Resources Institute. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784411698.ch06>
- Li-ping, L., Xiao-hua, L., Hong-bo, S., Zhao-Pu, L., Ya, T., Quan-suo, Z., & Jun-qin, Z. (2015). Ameliorants improve saline-alkaline soils on a large scale in northern Jiangsu Province, China. *Ecological Engineering*, 81, 328-334. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.032>
- Lopez-Acosta, N. P., Espinosa-Santiago, A. L., & Barba-Galdámez, D. F. (2019). Characterization of soil permeability in the former Lake Texcoco, Mexico. *Open Geosciences*, 11(1), 113-124. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0010>
- López-López, M. Á., & Estañol-Botello, E. (2007). Detección de deficiencias de hierro en *Pinus leiophylla* a partir de los efectos de dilución y concentración nutrimental. *Terra Latinoamericana*, 25(1), 9-15.
- Lugojan, C., & Ciulca, S. (2011). Evaluation of relative water content in winter wheat. *Journal of Horticulture, Forestry and Biotechnology*, 15(2), 173-177.
- Luna-Flores, W., Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J. J. M., & Pinzón-López, L. L. (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 343-353.
- Luna-Guido, M. L., Beltrán-Hernández, R. I., Solís-Ceballos, N. A., Hernández-Chávez, N., Mercado-García, F., Catt, J. A., ... Dendooven, L. (2000). Chemical and biological characteristics of alkaline saline soils from the former Lake Texcoco as affected by artificial drainage. *Biology and Fertility of Soils*, 32(2), 102-108. <https://doi.org/10.1007/s003740000223>
- Mbarki, S., Sytar, O., Cerda, A., Zivcak, M., Rastogi, A., He, X., ... Brestic, M. (2018). Strategies to mitigate the salt stress effects on photosynthetic apparatus and productivity of crop plants. In V. Kumar, S. Wani, P. Suprasanna, & L. S. Phan Tran (Eds.), *Salinity responses and tolerance in plants*. Volume 1 (pp. 85-136). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75671-4_4

- Oba, G., Nordal, I., Stenseth, N. C., Stave, J., Bjørå, C. S., Muthondeki, J. K., & Bii, W. K. A. (2001). Growth performance of exotic and indigenous tree species in saline soils in Turkana, Kenya. *Journal of Arid Environments*, 47(4), 499-511. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0734>
- Pimienta-Barrios, E., Robles-Murguía, C., & Martínez-Chávez, C. C. (2012). Respuesta ecofisiológica de árboles jóvenes nativos y exóticos a sequía y lluvia. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(5), 15-20.
- Qadir, M., Tubeileh, A., Akhtar, J., Larbi, A., Minhas, P. S., & Khan, M. A. (2008). Productivity enhancement of salt-affected environments through crop diversification. *Land Degradation & Development*, 19(4), 429-453. <https://doi.org/10.1002/ldr.853>
- R Core Team (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Rai, M. K., Jaiswal, V. S., & Jaiswal, U. (2010). Regeneration of plantlets of guava (*Psidium guajava* L.) from somatic embryos developed under salt-stress condition. *Acta Physiologiae Plantarum*, 32(6), 1055-1062. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0496-8>
- Reyes-Esteves, G. I., López-Upton, J., Velasco-García, M. V., & Jiménez-Casas, M. (2022). Genetic parameters of a progeny trial of *Pinus greggii* Engelman ex Parlatores var. *australis* Donahue & López in the Mixteca Alta of Oaxaca, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 28(1), 75-88. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2020.10.067>
- Richards, L. A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils. Washington, DC, USA: United States Department of Agriculture. <https://doi.org/10.2136/sssaj1954.03615995001800030032x>
- Rojas-Oropeza, M., Dendooven, L., Garza-Avenidaño, L., Souza, V., Philippot, L., & Cabirol, N. (2010). Effects of biosolids application on nitrogen dynamics and microbial structure in a saline-sodic soil of the former Lake Texcoco (Mexico). *Bioresource Technology*, 101(7), 2491-2498. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.088>
- Ruiz-Romero, E., Alcántara-Hernández, R., Cruz-Mondragon, C., Marsch, R., Luna-Guido, M. L., & Dendooven, L. (2009). Denitrification in extreme alkaline saline soils of the former lake Texcoco. *Plant and Soil*, 319, 247-257. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9867-y>
- Rzepka-Plevneš, D., Kulpa, D., & Charkot, S. (2006). Salt tolerance screening of *Pinus sylvestris* L. from the dunes of the south-west coast of the Baltic Sea under in vitro condition. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 4(2), 329-334.
- Sánchez-Bernal, E. I., Ortega-Escobar, H. M., Muñoz-Hernández, E. N., Can-Chulim, Á., Ortega-Baranda, V., & Ochoa-Somuano, J. (2020). Growth of seedlings of *Tabebuia rosea* and *Gliricidia sepium* under hydrochloric salinity conditions. *Terra Latinoamericana*, 38(2), 347-359. <https://doi.org/10.28940/TERRA.V38I2.608>
- Segura-Castruita, M. A., Gutiérrez, M. C., Ortiz, C. A., & Gómez, D. (2000). Clay soils of the eastern zone of the State of Mexico. *Terra*, 18(1), 35-44.
- Sigala-Rodríguez, J. Á., González-Tagle, M. A., & Jiménez-Pérez, J. (2015). Análisis de supervivencia para una reforestación con *Pinus pseudostrobus* Lindl. en el sur de Nuevo León. *Ciencia UANL*, 18(75), 61-66.
- Silva, C. C., Guido, M. L., Ceballos, J. M., Marsch, R., & Dendooven, L. (2008). Production of carbon dioxide and nitrous oxide in alkaline saline soil of Texcoco at different water contents amended with urea: A laboratory study. *Soil Biology and Biochemistry*, 40(7), 1813-1822. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.03.004>
- Soto-Coloballes, N. V. (2020). Proyectos y obras para el uso de los terrenos desecados del antiguo Lago de Texcoco, 1912-1998. *Estudios de Historia Moderna Contemporánea de México*, 58, 259-287. <https://doi.org/10.22201/IIH.24485004E.2019.58.70695>
- Suarez, D. L., Wood, J. D., & Lesch, S. M. (2006). Effect of SAR on water infiltration under a sequential rain-irrigation management system. *Agricultural Water Management*, 86(1-2), 150-164. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.07.010>
- Tarchouna, L. B., Merdy, P., Raynaud, M., Pfeifer, H. R., & Lucas Y. (2010). Effects of long-term irrigation with treated wastewater. Part I: Evolution of soil physico-chemical properties. *Applied Geochemistry*, 25(11), 1703-1710. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2010.08.018>
- Tan, X., Wu, J., Huang, J., Wu, M., & Zeng, W. (2017). Design of a new TDR probe to measure water content and electrical conductivity in highly saline soils. *Journal of Soils and Sediments*, 18(3), 1087-1099. <https://doi.org/10.1007/s11368-017-1838-6>
- Tomar, O. S., & Gupta, R. K. (1985). Performance of some forest tree species in saline soils under shallow and saline water-table conditions. *Plant and Soil*, 87, 329-335. <https://doi.org/10.1007/BF02181900>
- Torres-Rojo, J. M. (2021). Factores ambientales y físicos que afectan la supervivencia de siete especies forestales en el Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(64), 1-26. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.831>
- Vega-Jarquín, C., García-Mendoza, M., Jablonowski, N., Luna-Guido, M., & Dendooven, L. (2003). Rapid immobilization of applied nitrogen in saline-alkaline soils. *Plant and Soil*, 256, 379-388. <https://doi.org/10.1023/A:1026182211065>
- Wang, A., Zhang, G., Qie, Y. X., Xiang, D., Di, B., & Chen, Z. P. (2012). Effects of drought on physiological characteristics of needles of *Pinus bungeana* Zucc seedlings. *Plant Physiology Communications*, 48(2), 189-196.
- Woodward, A. J., & Bennett, I. J. (2005). The effect of salt stress and abscisic acid on proline production, chlorophyll content and growth of *in vitro* propagated shoots of *Eucalyptus camaldulensis*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 82, 189-200. <https://doi.org/10.1007/s11240-005-0515-4>

- Yin, C. Y., Zhao, J., Chen, X. B., Li, L. J., Liu, H., & Hu, Q. L. (2022). Desalination characteristics and efficiency of high saline soil leached by brackish water and Yellow River water. *Agricultural Water Management*, 263, 107461. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107461>
- Yu, J., Wang, Z., Meixner, F. X., Yang, F., Wu, H., & Chen, X. (2010). Biogeochemical characterizations and reclamation strategies of saline sodic soil in Northeastern China. *Clean-Soil, Air, Water*, 38(11), 1010-1016. <https://doi.org/10.1002/clen.201000276>
- Zhang, B., Horn, R., & Hallett, P. D. (2005). Mechanical resilience of degraded soil amended with organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 69(3), 864-871. <https://doi.org/10.2136/sssaj2003.0256>
- Zouari, M., Souguir, D., Bloem, E., Schnug, E., Hanchi, B., & Hachicha, M. (2019). Saline soil reclamation by agroforestry species under Kalaât Landelous conditions and irrigation with treated wastewater in Tunisia. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 2882928841. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06086-x>