



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

ESTABLECIMIENTO DE ESPECIES DE PINO EN SUELOS SALINOS DEL EX-LAGO DE TEXCOCO

CÉSAR ORTIZ TORRES

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2022



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **Establecimiento de especies de pino en suelos salinos del ex-Lago de Texcoco**, realizada por el estudiante: **César Ortiz Torres**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO


DR. ARMANDO GÓMEZ GUERRERO

ASESOR


DR. HÉCTOR MANUEL ORTEGA ESCOBAR

ASESOR


DR. JAVIER LÓPEZ UPTON

ASESORA


DRA. FRANCISCA OFELIA PLASCENCIA ESCALANTE

ASESOR


DR. TOMÁS MARTÍNEZ TRINIDAD

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, septiembre de 2022.

ESTABLECIMIENTO DE ESPECIES DE PINO EN SUELOS SALINOS DEL EX-LAGO DE TEXCOCO

César Ortiz Torres, D.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

RESUMEN

Ante la continua presión a urbanizar las áreas secas del extinto lago de Texcoco, se planteó con base en experiencias previas, probar diferentes especies de pino en un área aledaña al ex-lago de Texcoco. Se exploró la respuesta en campo de *Pinus pseudostrobus*, *P. greggii* var. *australis*, *P. ayacahuite* y *P. leiophylla*, además de la *Psidium guajava* especie tolerante. Para plantar cada árbol se propuso la utilización de una cepa con 1 m de profundidad y 0.60 m de diámetro, la cual se rellenó con un sustrato alternativo que consistió en una mezcla de suelo agrícola, tezontle y estiércol composteado de ovino, en proporción 50-25-25. En el suelo salino sódico y en el sustrato alternativo se midió el pH, la conductividad eléctrica, la resistencia mecánica y el contenido volumétrico de humedad. En el tejido vegetal de los árboles se midió el contenido hídrico relativo y la supervivencia de las plantas a 280 días. Las cepas con sustrato alternativo presentaron menores valores de pH, conductividad eléctrica, resistencia mecánica y contenido volumétrico de humedad respecto al suelo salino sódico. La respuesta del contenido hídrico relativo en el tejido de las plantas fue distinta entre los pinos y *P. guajava* debido a los distintos procesos fisiológicos entre las plantas para adaptarse a las condiciones de salinidad. *P. guajava* presentó mayor supervivencia que los pinos a los 280 días. Se encontró que las cepas con sustrato alternativo pueden ayudar a establecer especies tolerantes en condiciones de salinidad. En un segundo experimento se evaluó el efecto en el desarrollo de *P. greggii* var. *australis* a las salinidades: clorhídrica, sulfática y sulfático-sódica; con niveles de conductividad eléctrica para cada sal de: 3, 6, 9 y 12 dS m⁻¹; después de 172 días se observaron cortes transversales de raíces de primer orden por medio de microscopía electrónica de barrido. El incremento en diámetro, la altura, la biomasa radical y el índice de calidad de Dickson fueron analizados y se observó una respuesta inversa en el desarrollo de la planta respecto al nivel de salinidad aplicado. Los tratamientos con 3 dS m⁻¹ sin importar el tipo de salinidad fueron los que menos afectaron a la planta, mientras que la salinidad clorhídrica con 12 dS m⁻¹ fue el tratamiento que más daño ocasionó. Las imágenes por microscopía electrónica no mostraron presencia de gránulos de almidón en el tratamiento de 12 dS m⁻¹, si se detectaron en el tratamiento testigo. *P. greggii* var. *australis* tolera hasta 3 dS m⁻¹, después de este valor la calidad del árbol se deteriora.

Palabras clave: Salinidad, *Pinus*, *Psidium guajava*, conductividad eléctrica, microscopía.

ESTABLISHMENT OF PINE SPECIES IN SALINE SOILS AT THE EX-LAKE TEXCOCO

César Ortiz Torres, D.C.
Colegio de Postgraduados, 2022

ABSTRACT

In view of the continuous pressure to urbanize the dry areas of the extinct Lake of Texcoco, it is proposed to establish different pine species in an area adjacent to the ex-lake of Texcoco based on previous experiences. The field response of *Pinus pseudostrobus*, *P. greggii* var. *australis*, *P. ayacahuite* and *P. leiophylla* as well as *Psidium guajava* was explored. To plant each tree, a hole with 1 m deep and 0.60 m in diameter was proposed, which was filled with an alternative substrate consisting of a mixture of agricultural soil, tezontle and composted sheep manure, in a 50-25-25 ratio. In the sodium saline soil and in the alternative substrate of the holes, pH, electrical conductivity, mechanical resistance and volumetric moisture content were measured, while relative water content and plant survival at 280 days were measured in the plant tissue of the trees. The holes with alternative substrate presented lower values of pH, electrical conductivity, mechanical resistance and volumetric water content with respect to the sodium saline soil. The response of the relative water content in the plant tissue was different between pines and *P. guajava* due to the different physiological processes carried out by each plant to adapt to the salinity conditions. *P. guajava* showed higher survival than pines at 280 days. It was also found that holes with alternative substrate could help to establish species tolerant to salinity conditions. In a second experiment, the effect of hydrochloric, sulfate and sodium sulfate salts on the development of *Pinus greggii* var. *australis* was evaluated; with electrical conductivity levels for each salt of: 3, 6, 9 and 12 dS m⁻¹; after 172 days, cross sections of first order roots were observed through images obtained by scanning electron microscopy. The increase in diameter, height, root biomass and Dickson's quality index were analyzed and an inverse response in plant development was observed with respect to the level of salinity applied. The treatments with 3 dS m⁻¹ regardless of the type of salt were those that least affected plant development, while hydrochloric salt with 12 dS m⁻¹ was the treatment that caused the most damage to the plant. Scanning electron microscopy images did not show the presence of starch granules when 12 dS m⁻¹ treatments were used; however, they were detected in the control treatment. *P. greggii* var. *australis* tolerates up to 3 dS m⁻¹, after this value the quality of the tree begins to deteriorate.

Key words: Salinity, *Pinus*, *Psidium guajava*, electrical conductivity, microscopy.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Armando Gómez Guerrero por su apoyo, paciencia y acompañamiento durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al Dr. Héctor Manuel Ortega Escobar por su asesoría y consejos para la elaboración del presente trabajo.

Al Dr. Javier López Upton por sus consejos y apoyo durante el desarrollo de la investigación.

A la Dra. Francisca Ofelia Plascencia Escalante por sus comentarios y disposición para la revisión de este trabajo.

Al Dr. Tomás Martínez Trinidad por sus atinados comentarios, sugerencias y disposición para mejorar el presente trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo otorgado para la realización de esta investigación.

Al Colegio de Postgraduados por brindarme la facilidad y apoyo para el establecimiento del experimento.

Al Posgrado en Ciencias Forestales por haberme brindado la oportunidad de formarme como profesional a nivel posgrado.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTAS DE CUADROS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Salinidad	3
La salinidad en el suelo.....	3
La salinidad en las plantas.....	4
Las raíces en condiciones de salinidad.....	5
Características edafológicas del área de estudio.....	7
Árboles en condiciones de salinidad.....	9
CAPÍTULO I. El desafío para establecer especies arbóreas en suelos salinos del ex-lago de Texcoco.....	15
1.1 RESUMEN	15
1.2 ABSTRACT	16
1.3 INTRODUCCIÓN	17
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
1.4.1 Establecimiento del experimento	19
1.4.2 Muestreo de suelo y sustrato.....	21
1.4.3 Medición de contenido de humedad relativa (CHR) en tejido vegetal y supervivencia.....	23
1.4.4 Diseño y análisis estadístico del experimento	23
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
1.5.1 Evaluación de las cepas con sustrato alternativo (CSA) respecto al suelo salino sódico (SSS)	25
1.5.2 pH en cepas con sustrato alternativo (CSA)	26
1.5.3 CE en cepas con sustrato alternativo (CSA).....	27
1.5.4 Contenido Hídrico Relativo (CHR)	28
1.5.5 Supervivencia	30

1.6 CONCLUSIONES	33
CAPÍTULO II. Efecto de diferentes tipos de salinidad en el desarrollo de brinzales de <i>Pinus greggii</i> var. <i>australis</i>	34
2.1 RESUMEN	34
2.2 ABSTRACT	35
2.3 INTRODUCCIÓN	36
2.3.1 Objetivos	37
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS	38
2.4.1 Ubicación del experimento	38
2.4.2 Tratamientos utilizados	38
2.4.3 Manejo del experimento	39
2.4.4 Análisis estadístico	40
2.5 RESULTADOS	41
2.5.1 Efecto en el incremento en diámetro (ID ₃₀) y altura (IA ₃₀) en el tiempo	41
2.5.2 Efectos en ID ₁₇₂ , IA ₁₇₂ , BR ₁₇₂ e ICD ₁₇₂ al final del experimento	42
2.5.3 Comparación de medias para tipos de salinidad y concentraciones salinas al final del experimento	43
2.5.3.1 Incremento en diámetro (ID ₁₇₂)	43
2.5.3.2 Incremento en altura	45
2.5.3.3 Biomasa radical (BR ₁₇₂)	47
2.5.3.4 Índice de calidad de Dickson (ICD ₁₇₂)	47
2.5.3.5 Observación en microscopía electrónica de barrido (MEB)	47
2.6 DISCUSIÓN	¡Error! Marcador no definido.
2.6 CONCLUSIONES	¡Error! Marcador no definido.
CONCLUSIONES GENERALES	54
LITERATURA CITADA	55
ANEXOS	6767

LISTAS DE CUADROS

Cuadro 1. Listado de especies de árboles y arbustos tolerantes a condiciones de salinas.	12
Cuadro 2. Características químicas del sitio (valores medidos del extracto de saturación).....	22
Cuadro 3. Medidas de valores de media y desviación estándar de todas las cepas (SSS y CSA).....	25
Cuadro 4. pH de CSA (donde están establecidas las diferentes especies de árboles) y en SSS en tres periodos (100, 210 días y 280 días)	27
Cuadro 5. Contenido hídrico relativo por especie en distintas temporadas.....	29
Cuadro 6. Significancia de efectos en el tiempo y sus interacciones para el diámetro y altura de plantas de <i>P. greggii</i> var. <i>australis</i> sometidas a distintas salinidades por 172 días.....	41
Cuadro 7. Significancia de efectos para los tratamientos a distintos días de establecido el experimento a distintas salinidades por 172 días en plantas de <i>P. greggii</i> var. <i>australis</i> en las variables diámetro y altura ($p < 0.05$).	42
Cuadro 8. Valores de probabilidad en el análisis de varianza de las variables evaluadas después de 172 días de plantas de <i>P. greggii</i> var. <i>australis</i> sometidas a distintas concentraciones y tipos de salinidad.	43
Cuadro 9. Comparación de medias entre el testigo y los tratamientos con diferentes tipos de salinidad después de 172 días en plantas de <i>P. greggii</i> var. <i>australis</i> (valores medios y error estándar).	44
Cuadro 10. Comparación de medias entre el testigo y las distintas concentraciones salinas después de 172 días en plantas de <i>P. greggii</i> var. <i>australis</i> (valores medios y error estándar).....	45

LISTA DE FIGURAS

- 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, y f) plantas establecidas. 19
- 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). 20
- Figura 3.** Supervivencia de las especies en CSA y en SSS en el periodo de 280 días. 31
- Figura 4.** Comportamiento de las diferentes variables evaluadas al final del experimento de plantas de *P. greggii* var. *australis* de acuerdo con las concentraciones salinas presentes en todos los tipos de salinidad. a) ID₁₇₂ = Incremento en diámetro, b) IA₁₇₂ = incremento en altura, c) BR₁₇₂= Biomasa radical, y d) ICD₁₇₂ = Índice de calidad de Dickson. La dispersión indicada en las barras corresponde al error estándar. 46
- Figura 5.** Micrografías por microscopía electrónica de barrido (MEB) de cortes transversales de raíces de *P. greggii* var. *australis*. En la zona de la corteza se observa la presencia o ausencia de gránulos de almidón para los distintos tratamientos de tipos de salinidad con 12 dS m⁻¹. a) tratamiento Testigo, b) sulfático-sódica, c) sulfática, d) clorhídrica. Co = Zona de corteza de la raíz, GA = gránulos de almidón (las flechas indican las zonas con presencia de gránulos de almidón). 48

INTRODUCCIÓN GENERAL

El ex-lago de Texcoco es un área salina que estaba conformado por cinco lagos (Zumpango, Xaltocan, San Cristóbal, Xochimilco y Chalco) y se estima que su extensión más grande llegó a cubrir una superficie de 27,000 ha (Vitz, 2012). Ha sido un área en la cual se han realizado una gran cantidad de estudios (descripción geológica, edáfica, botánica y de restauración) y obras de aprovechamiento (rehabilitación con especies forrajeras y forestales, explotación de sosa caustica, creación de plantas tratadoras de aguas grises, establecimiento del ex aeropuerto internacional de la ciudad de México y actualmente la creación del Parque ex-lago de Texcoco) (Carranza-Edwards, 2018; Gutiérrez y Ortiz, 1999; Pérez-Miranda *et al.*, 2011; Rzedowski, 1957; SHCP, 1969; Soto-Coloballes, 2019). Esta zona presenta una fuerte presión por urbanización, ya sea a través de la creación de parques o vías de comunicación terrestre (Moreno, 2007). Sin embargo, debido al origen de su condición salina y a las propiedades fisicomecánicas del suelo, hacen de esta zona un área muy difícil de ser aprovechada.

Los diversos esfuerzos que se han realizado para la habilitación de esta área salina han tenido el objetivo de disminuir las tolvaneras que afectan la ciudad de México provocadas por los fuertes vientos de la zona. Los trabajos de reforestación en la zona datan desde 1914 (Alcocer y Williams, 1996) y los géneros que se utilizaron fueron el *Tamarix*, *Eucalyptus* y *Salix* (Vitz, 2012). En esta primera mitad del siglo XX se realizaron otros proyectos para la recuperación de la zona utilizando árboles y otras especies vegetales, tal fue el caso del proyecto “Parque agrícola de la ciudad de México” presentado en 1930, el cual, tenía la finalidad de utilizar los terrenos desecados del ex vaso de Texcoco para fines agropecuarios y controlar el flujo hídrico superficial de la cuenca de México (Espinosa-Castillo, 2008). Así también, la Sociedad Forestal Mexicana junto con Miguel Ángel de Quevedo, propusieron forestar los terrenos salinos desecados introduciendo árboles del género *Acacia* y *Eucalyptus*, de acuerdo a lo citado por Soto-Coloballes (2019). De esta forma, y de acuerdo a las continuas intervenciones del hombre, así como los procesos naturales de sucesión, los terrenos salinos del ex-lago continuamente se han poblado por distintas especies como: *Alnus acuminata* Kunth, *Casuarina equisetifolia* L., varios *Eucalyptus*, *Tamarix juniperina* Bunge, *Schinus molle* L., *Populus alba* L.,

Distichlis spicata (L.) Greene, *Suaeda nigra* J.F. Macbr., entre otras (Rzedowski, 1957); y según su capacidad de tolerancia a los distintos niveles de salinidad estas especies están presentes en distintas áreas.

Con la finalidad de encontrar especies alternativas y diferentes a las comúnmente utilizadas (eucalipto y casuarinas), el presente trabajo se enfocó a probar en campo diferentes especies arbóreas como: *Pinus greggii*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite*, *P. leiophylla*; y *Psidium guajava*; especie tolerante a salinidad. Es evidente que la zona del ex-lago Texcoco está inmersa en una zona periurbana y en el futuro cercano se buscará el uso de especies arbóreas acordes al contexto urbano. La selección de especies de pino se basa de experiencias anteriores con estos árboles en áreas verdes del Colegio de Postgraduados, el cual se encuentra ubicado a las orillas de lo que fue el lago de Texcoco, mientras que *P. guajava* por su tolerancia a la salinidad. Además, se realizó un experimento en invernadero utilizando *P. greggii*, bajo distintos tipos de salinidad (clorhídrica, sulfática y sulfática sódica) y diferentes niveles (0, 3, 6, 9 y 12 dS m⁻¹), con la finalidad de conocer los niveles críticos de salinidad de una de las especies más utilizadas para la reforestación en la zona central de México.

REVISIÓN DE LITERATURA

Salinidad

La salinización es la acumulación de sales solubles en cuerpos de agua y en la solución del suelo superficial (Rengasamy, 2006). La acumulación excesiva de sales en el suelo tienen efectos adversos sobre sus propiedades físicas y químicas, y en el proceso de adquisición de nutrientes para el crecimiento de las plantas (Li *et al.*, 2015). La acumulación de sales en el suelo conduce a la pérdida de este recurso, y por lo tanto a la pérdida de los servicios que pueda ofrecer, como la provisión de bienes mediante la producción agrícola, la salud ambiental mediante la filtración y almacenamiento de agua, y el servicio escénico por la conservación del paisaje (Brevik *et al.*, 2015).

La salinidad se clasifica en primaria y secundaria. La primaria, consiste en el desarrollo de sales a través de procesos naturales, que incluyen principalmente la intemperización física o química y el transporte desde el material original, como depósitos geológicos o aguas subterráneas; es decir, con la salinidad primaria se forman suelos salinos de manera natural (Chari *et al.*, 2013). En cambio, la salinidad secundaria se detona mediante la intervención humana. Por ejemplo, mediante el riego con aguas salinas u otras prácticas de irrigación inadecuadas que son a menudo acompañadas de malas condiciones de drenaje (Fan *et al.*, 2012). Por otro lado, la salinidad puede ser descrita como: cuantitativa, la cual mide la totalidad de sales solubles presentes en una solución y se obtiene a través de la CE (dS m^{-1}); y cualitativa, que refiere a la composición iónica de las sales presentes en el agua o suelo.

La salinidad en el suelo

Los suelos afectados por acumulación de sales se pueden agrupar en suelos salinos, suelos sódicos y suelos salino-sódicos (Nouri *et al.*, 2017). Los suelos salinos se distinguen por el gran contenido de sales solubles, suelos sódicos por sus altos niveles de iones de sodio y suelos salino-sódicos por exceso de sales y sodio intercambiable (Sastre-Conde *et al.*, 2015). Los suelos salino-sódicos tienen propiedades similares a los suelos sódicos, como el exceso de sodio y la estructura impermeable (Qadir *et al.*, 2008). En estos suelos la concentración alta de Na^+ desplaza cationes como Ca^{+2} y Mg^{+2} y se

mantiene unido a partículas de arcilla causando una degradación estructural significativa. A medida que el sodio intercambiable se hidroliza, los enlaces entre las partículas del suelo se debilitan, se expanden y a menudo se desprenden, lo que aumenta la dispersabilidad y la susceptibilidad a la erosión por agua y viento (de la Paix *et al.*, 2011).

Cuando los suelos sódicos se secan se vuelven densos y sin estructura debido a que la agregación natural pierde estabilidad y la matriz del suelo se hace muy dispersa. En la superficie del suelo, la arcilla dispersa puede actuar como adhesivo, formando costras densas que impiden la infiltración del agua, el enraizamiento y la emergencia de las plántulas. El grado de formación de costras depende de la textura del suelo, la mineralogía de las arcillas y el contenido de sodio intercambiable. Además, por la génesis de algunos suelos se pueden formar horizontes nátricos (sódicos), que a menudo le confieren una estructura columnar dentro del perfil del suelo. Los subsuelos sódicos pueden ser densos, con una capacidad de almacenamiento de agua reducida y mala aireación. De esta forma, las partículas finas (arcillas) se mueven y reacomodan en la matriz del suelo obstruyendo macro y microporos y reduciendo así la conductividad hidráulica (DERM, 2011).

La salinidad en las plantas

La salinidad es uno de los principales factores ambientales que limitan el crecimiento y la productividad de plantas que no toleran esta condición (Allakhverdiev *et al.*, 2000). Cuando las sales son absorbidas, éstas se acumulan en las hojas viejas acelerando su muerte, por lo cual se afecta el suministro de asimilados u hormonas y, en consecuencia, se afecta el crecimiento de tallos, hojas y raíces (Kayama *et al.*, 2003; Munns, 1993). Estos efectos nocivos en el crecimiento, se asocian con un bajo potencial osmótico ($-\Psi$) de la solución del suelo (estrés hídrico), desequilibrio nutricional, efectos iónicos específicos (estrés salino) o una combinación de estos factores (Shanon, 1997).

Diversas especies vegetales han desarrollado estrategias para enfrentar la salinidad, abarcando mecanismos fisiológicos y bioquímicos para sobrevivir en suelos con alta concentración de sales y responder al estrés a niveles moleculares, celulares, metabólicos y de fisiología vegetal (Gupta y Huang, 2014). Las especies halófitas están

adaptadas para absorber sal de su medio y utilizarla como un agente osmótico interno en la vacuola; mientras que las glicófitas son especies que toleran niveles moderados de salinidad, retienen las sales en las raíces y los tallos, además de tener la capacidad de excluir el Na^+ o el Cl^- de las células de las hojas (Läuchli y Grattan, 2012).

Los mecanismos de adaptación o tolerancia a la salinidad incluyen, a) homeostasis (autorregulación) iónica y compartimentación, b) transporte y captación de iones, c) biosíntesis de osmoprotectores y solutos compatibles, d) activación de la enzima antioxidante y síntesis de compuestos antioxidantes, e) síntesis de poliaminas, f) generación de óxido nítrico (NO) y g) modulación hormonal (Gupta y Huang, 2014).

Otros autores como Levitt (1980) mencionan que la resistencia de las plantas a las sales está categorizado por dos mecanismos: la evasión, evita o retrasa las concentraciones de sal nocivas para la planta ya sea a través de la exclusión, excreción o dilución; y la tolerancia, en el cual las plantas están específicamente adaptadas para tolerar la acumulación de iones. Mientras Munns y Tester, (2008) mencionan que la tolerancia a la salinidad en las plantas está condicionada por tres características: la tolerancia al estrés osmótico, la capacidad de poder excluir Na^+ de las hojas y la habilidad de los tejidos para acumular concentraciones de Na^+ o Cl^- .

De esta manera, los mecanismos para afrontar el estrés salino pueden manifestarse de diferentes maneras según la especie. Se ha encontrado que los cotiledones de girasol tienen la capacidad de incrementar los niveles de nitración de tirosinas en las proteínas como respuesta al estrés salino, permitiéndole a la planta desarrollarse adecuadamente (David *et al.*, 2015). Mientras que *Ricinus communis* L. genera diferentes modificaciones tanto fisiológicas como morfológicas para tolerar la salinidad tales como cambios en su tallo y raíz, en su regulación estomática, en la fotosíntesis, la fluorescencia de la clorofila y la capacidad del ajuste osmótico (Wang *et al.*, 2019).

Las raíces en condiciones de salinidad

Una de las funciones de las raíces de los árboles son la absorción de agua y de elementos minerales del suelo. Sin embargo, la presencia de altas concentraciones salinas en el suelo reduce o impide realizar esta función, más en ambientes salinos

ciertas especies evolucionaron para afrontar y sobrevivir a la salinidad. En el ecosistema de manglar se encuentran diferentes especies de árboles que crecen en altas concentraciones salinas, suelos con poca estructura y baja aireación. Para superar estas condiciones adversas, los árboles en humedales salinos han creado sistemas radicales que les permiten excluir o excretar las sales presentes de sus tejidos a través de sistemas radiculares emergentes llamados neumatóforos (Boland *et al.*, 2006).

Bernstein y Hayward (1958) mencionan que plantas con raíces poco profundas o con una mayor cantidad de raíces superficiales y con baja capacidad de absorción de agua, tienen una menor tolerancia a la salinidad en comparación con aquellas que tienen mayor cantidad de raíces profundas. En parte esto podría explicarse porque mientras el suelo se mantiene con humedad cerca de saturación, la concentración de sales disminuye.

Las especies halófitas presentan diversos mecanismos para tolerar la presencia de sales en el suelo, ya sea, a través de la excreción de iones de Na^+ y/o Cl^- por las hojas o mediante su compartimentación en las vacuolas. Algunas de estas especies absorben estos iones por sus raíces, los cuales son transportados a glándulas salinas que se encuentran en la superficie de sus hojas, cristalizándose para así poder ser desechadas. Sin embargo, cuando las especies no son tolerantes a estas condiciones, sus raíces deben de impedir la absorción de estos iones (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2013).

Existen diversos componentes orgánicos (osmolitos) que impiden que las sales excretadas ubicadas en las hojas de las plantas aumenten el potencial osmótico del citoplasma y la vacuola y propicien su deshidratación. Algunas de estos componentes son: la glicina betaína, la prolina, el sorbitol, la sacarosa, entre otras; los cuales, al incrementar su presencia en las plantas disminuyen el potencial hídrico intracelular y facilitan la entrada de agua (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2013). En *Schinopsis quebracho-colorado* (Schltdl.) F.A. Barkley & T. Mey. se observó que el aumento en el contenido de prolina en las raíces contribuyó a aliviar el estrés por NaCl (Meloni *et al.*, 2008). Así también, el incremento de esta sustancia ayuda a preservar la estructura de las membranas de la planta contra el estrés osmótico (Kocheva y Georgiev, 2003).

A pesar de que diversas especies hayan desarrollado mecanismos de adaptación para acumular o expulsar las sales, existen otras que lo hacen por medio de la disminución de su biomasa radicular (Amtmann, 2009). *Olea europaea* L., el olivo, aunque es una especie tolerante a la salinidad, cuando es expuesto a niveles elevados de salinidad su crecimiento vegetativo se ve afectado, así como su densidad estomática. La salinidad provoca la disminución de su biomasa radical y a su vez incrementa la acumulación de Na^+ en las raíces, lo cual puede deberse a una adaptación de esta especie para que no distribuya las sales a las hojas (Bader *et al.*, 2015).

Contrariamente a la estrategia de reducir la biomasa radical algunas especies bajo condiciones de salinidad, responden aumentándola en función de la época del año. Por ejemplo, Akeroyd *et al.* (1998), reportaron que la biomasa radical de *Eucalyptus largiflorens* (F. Muell), presente en los primeros 50 cm del suelo, es más abundante cuando la humedad en el suelo aumenta como consecuencia de las precipitaciones. Lo que constituye una estrategia fisiológica para aprovechar agua menos salina, que la disponible el resto del año.

En pinos se ha encontrado que algunas especies de ambientes xéricos desarrollan más cantidad de raíces, como parte de su adaptación, para aprovechar la escasa humedad de estos ambientes. Córdoba-Rodríguez *et al.* (2011) evaluaron la tolerancia a la sequía en diferentes poblaciones de *Pinus pinceana* Gordon y encontraron que la biomasa de raíces laterales de poblaciones procedentes de zonas más áridas era mayor en comparación con poblaciones procedentes de zonas con mayor humedad.

Características edafológicas del área de estudio

El área de estudio se encuentra dentro de la zona de lo que fue el lago de Texcoco. En 1977, de acuerdo con el Departamento de estudios del Territorio Nacional, sus suelos se clasificaron como Solonchaks gléyicos, que implica suelos anóxicos y con problemas de sales. Velásquez *et al* (citado por Tarín y Velázquez, 1986) reportaron un estudio realizado en 12,348 ha, se identificó la presencia de Inceptisoles (suelos de desarrollo incipiente) en el 84 % de la superficie, Entisoles (Suelo con un horizonte sobre un

horizonte C poco desarrollado) en 15.7 % de la zona y Molisoles (Suelo con horizonte A profundo y fértil) en 0.34 % del área.

En los suelos del ex-lago de Texcoco se tiene la presencia de carbonatos de calcio, acumulaciones que están relacionadas con la existencia de lechos con aguas salinas, intensa actividad biológica y altas concentraciones de calcio, que a su vez se encuentran en estratos laminares y nodulares (Gutierrez *et al.*, 1998). De acuerdo con López-Ávila *et al.* (2004), los sedimentos lacustres (jaboncillo) existentes en los suelos profundos tienen condiciones de alta alcalinidad, saturación permanente, y debido al acomodamiento esponjoso de sus partículas presentan alta compresibilidad y muy baja densidad aparente. Así también, el alto contenido de sodio contribuye en el deterioro de las propiedades físicas del suelo formando costras superficiales, reduciendo la infiltración, aumentando la resistencia a la penetrabilidad en el suelo y reduciendo la aireación dando lugar a condiciones anóxicas y o hipóxicas para las raíces (Läuchli y Grattan, 2012). La baja aireación lleva a un estado de alta reducción y emisión de gases como ácido sulfhídrico, metano y óxido nitroso.

La humedad permanente que presentan los sedimentos lacustres es debido a sus características físicas y a la presencia de agua freática que puede alcanzar distintos niveles de profundidad, estas variaciones son dependientes de las precipitaciones y niveles de evaporación. Coras Merino *et al.*, (2014) mencionan que en suelos del ex-lago de Texcoco los niveles freáticos pueden tardar en elevarse hasta cuatro años, y desplazarse de los 2 m de profundidad a 1 m, esto como consecuencia de la intensidad de las precipitaciones y la disminución de la evaporación.

En Australia, las poblaciones de *Eucalyptus grandis* W. Hill y *E. camaldulensis* Dehnh. influyen en la profundidad de los niveles de aguas freáticas salinas y se ha encontrado que en un transecto de 150 m, los niveles freáticos pueden variar desde los 2.6 m hasta los 7.8 m de profundidad (Feikema *et al.*, 2010). Además de la transpiración por los árboles, esta variabilidad en los niveles freáticos se debe a las características físicas de los suelos y a su capacidad de retención de humedad.

Tarín y Velázquez (1986) citan diferentes tratamientos de mejoramiento para los suelos salinos presentes en el ex-lago de Texcoco, destacando: la aplicación de diferentes drenes y láminas de lavado, aplicación de azufre para mejorar las condiciones del suelo y el lavado de suelos con diluciones sucesivas de aguas freáticas y aguas negras. Por otro lado, reporta que la *Kochia scoparia* L. Schrad, var. *Esmeralda*, un arbusto nativo de Eurasia, se estableció con éxito en suelos que presentan una conductividad eléctrica menor a los 25 dS m⁻¹ y con buenas condiciones de humedad a través de la siembra aérea. Sin embargo, la observación directa en campo indica que no hay un plan específico para *Kochia scoparia* y sólo se reconoce como una planta invasora.

Árboles en condiciones de salinidad

El uso de árboles como estrategia para habilitar o cultivar áreas con problemas de sales es un reto que afrontan distintos países. En Australia el 38.4 % del territorio presenta problemas de sales, Asia el 33.9 %, América el 15.8 %, África el 8.6% y Europa el 3.3 % (Shahid *et al.*, 2018). Algunos aspectos positivos que se han encontrado al utilizar árboles y arbustos en suelos salinos son: ayudan a disminuir los niveles freáticos salinos mediante la absorción de aguas subterráneas y la acumulación de sales en las raíces; y a retener las filtraciones de agua en canales de riego mediante el establecimiento de árboles a lo largo del canal (Marcar *et al.*, 1999).

Por otro lado, se ha encontrado que la variabilidad genética de ciertas especies les permite adaptarse a condiciones de salinidad. Este es el caso del *Pinus sylvestris* L., especie que presenta poblaciones que llegan a tolerar condiciones de salinidad que les permite desarrollarse en costas del Mar Báltico en Polonia (Rzepka-Plevneš *et al.*, 2006). Sin embargo, *P. sylvestris* var. *mongolica* introducida en el noroeste de China con fines de rehabilitación, presenta problemas de adaptación al aumento de la salinidad en la zona (Yin *et al.*, 2020).

La utilización de especies nativas para habilitar sitios con problemas de sales es otra alternativa. En Kenia se ha evaluado el establecimiento de especies arbóreas nativas y exóticas en suelos salinos, encontrando que las nativas tienen mayor supervivencia debido a que están adaptadas a desarrollarse en condiciones de salinidad y de baja

fertilidad (Olukoye *et al.*, 2003). Es entendible que sea más recomendado la utilización de especies nativas. Sin embargo, hay veces que lo que se busca es recuperar las áreas, promoviendo la acumulación de materia orgánica para volverlas productivas, por lo que se tiene que recurrir al uso de especies exóticas.

La introducción de especies exóticas en ciertas regiones puede ayudar a mitigar los problemas de salinización, en donde la vegetación nativa no es apta para afrontar la problemática. Se ha encontrado que especies como *Elaeagnus angustifolia* L., *Populus euphratica* Oliv. y *Ulmus pumila* L. tienen la capacidad de desarrollarse en ambientes salinos con capas freáticas elevadas, además de tener una tasa elevada de transpiración lo que las hace una opción viable para recuperar zonas con esta condición (Khamzina *et al.*, 2009). Por ejemplo, en India han utilizado combinaciones de árboles nativos (*Terminalia arjuna* (Roxb. ex DC.) Wight & Arn., *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. y *Azadirachta indica* A. Juss.) y exóticos (*Acacia auriculiformis* Benth., *Albizia lebbbeck* (L.) Benth. y *Populus deltoides* Marshall) para habilitar suelos sódicos durante 50 años. Esta forestación no solo ayudó a disminuir significativamente el pH y la CE, favoreciendo la acumulación de carbono orgánico, sino que también estimuló la sucesión autogénica, mejorando la estructura y estabilidad de la comunidad producto de la forestación (Singh *et al.*, 2012).

Las especies más utilizadas en México para habilitar los suelos salinos del ex-lago de Texcoco han sido principalmente especies de *Eucalyptus*, *Casuarina*, *Opuntia*, *Tamarix*, *Salix* y *Schinus molle* (Alcocer y Williams, 1996; Ramírez-Carmona *et al.*, 2016; Rzedowski, 1957). Sin embargo, es necesario explorar especies alternativas que tengan potencial de tolerar las condiciones salinas y realizar pruebas para conocer sus intervalos de tolerancia.

Algunas especies con presencia en México, que han sido reportadas en otros estudios sobre tolerancia a condiciones de ligera, moderada y alta salinidad se muestran en el Cuadro 1. Para las cuales es necesario realizar ensayos de verificación de su tolerancia a las sales, así como a las condiciones climáticas y edáficas particulares presentes en donde se busca su establecimiento. Esto debido a que aun dentro de una

especie la tolerancia a la salinidad puede ser distinta según la población o variedad de la especie (Cony y Trione, 1998).

Arborizar zonas salinas es un proceso muy complicado, pero se requieren de esfuerzos para promover el establecimiento de árboles en la frontera urbana de las grandes ciudades y sobre las cuales existen suelos salinos. Este es el caso de la región del ex-lago de Texcoco, una zona de alta presión humana y con una necesidad alta de crear entornos ambientalmente saludables y atractivos.

Cuadro 1. Listado de especies de árboles y arbustos tolerantes a condiciones de salinas.

Especie	Condición salina		
	Ligera (< 5 dS m-1)	Moderada (5 -14 dS m-1)	Alta (> 14 dS m-1)
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd.			(Tomar <i>et al.</i> , 1998)
<i>Acacia salicina</i> Lindl.		(Marcar <i>et al.</i> , 1999)	
<i>Acacia saligna</i> (Labill.) Wendl.		(Marcar <i>et al.</i> , 1999)	
<i>Amorpha fruticosa</i> L.			(Zhang, 2014)
<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	(J. Zhang, 2014)		
<i>Azadirachta indica</i> A.Juss.		(Gill y Abrol, 1991; Marcar <i>et al.</i> , 1999)	
<i>Albizia lebeck</i> (L.) Benth.	(Gill y Abrol, 1991)	(Marcar <i>et al.</i> , 1999)	
<i>Casuarina equisetifolia</i> L.		(Dagar <i>et al.</i> , 2001; Marcar <i>et al.</i> , 1999; Tomar <i>et al.</i> , 1998)	(Gill y Abrol, 1991; Tomar y Gupta, 1985)
<i>Casuarina cunninghamiana</i> Miq.		(Marcar <i>et al.</i> , 1999)	(Gill y Abrol, 1991; Marcar <i>et al.</i> , 1999)
<i>Casuarina glauca</i> Sieber ex Spreng.			(Marcar <i>et al.</i> , 1999)
<i>Corylus colurna</i> L.	(Šerá, 2017)		
<i>Fraxinus americana</i> L.	(Appleton <i>et al.</i> , 2015)		
<i>Fraxinus velutina</i> Torr.	(Zhang, 2014)		
<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	(Appleton <i>et al.</i> , 2015)		
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.		(Tomar <i>et al.</i> , 1998)	

Especie	Condición salina		
	Ligera (< 5 dS m-1)	Moderada (5 -14 dS m-1)	Alta (> 14 dS m-1)
<i>Juglans nigra</i> L.	(Appleton <i>et al.</i> , 2015)		
<i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm.	(Appleton <i>et al.</i> , 2015)		
<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	(Dagar <i>et al.</i> , 2001; Gill y Abrol, 1991; Marcar <i>et al.</i> , 1999)	(Marcar <i>et al.</i> , 1999; Tomar <i>et al.</i> , 1998; Tomar y Gupta, 1985)	
<i>Magnolia grandiflora</i> L.	(Appleton <i>et al.</i> , 2015)		
<i>Melaleuca quinquenervia</i> (Cav.) S.T.Blake		(Marcar <i>et al.</i> , 1999)	
<i>Parkinsonia aculeata</i> L.		(Marcar <i>et al.</i> , 1999)	
<i>Pinus caribaea</i> var. <i>hondurensis</i> (Sénécl.) W.H.Barrett & Golfari	(Sun y Dickinson, 1993)		
<i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl.	(Mohedano-Caballero <i>et al.</i> , 2005)		
<i>Pinus halepensis</i> Mill.	(Gill y Abrol, 1991; Marcar <i>et al.</i> , 1999)		
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	(Jimenez-Casas y Zwiazek, 2013)		
<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth.	(Dagar <i>et al.</i> , 2001)	(Tomar <i>et al.</i> , 1998)	
<i>Populus alba</i> L.	(Appleton <i>et al.</i> , 2015; Šerá, 2017)		
<i>Prosopis chilensis</i> (Molina) Stuntz	(Olukoye <i>et al.</i> , 2003)		(Marcar <i>et al.</i> , 1999)
<i>Prosopis juliflora</i> (Sw.) DC.		(Tomar y Gupta, 1985)	(Dagar <i>et al.</i> , 2001; Gill y Abrol, 1991; Marcar <i>et</i>

Especie	Condición salina		
	Ligera (< 5 dS m-1)	Moderada (5 -14 dS m-1)	Alta (> 14 dS m-1)
			<i>al.</i> , 1999; Tomar <i>et al.</i> , 1998)
<i>Psidium guajava</i> L.	(Dagar <i>et al.</i> , 2001)		
<i>Punica granatum</i> L.	(Dagar <i>et al.</i> , 2001)		
<i>Quercus palustris</i> Münchh.	(Appleton <i>et al.</i> , 2015)		
<i>Quercus rubra</i> L.	(Appleton <i>et al.</i> , 2015)		
<i>Quercus virginiana</i> Mill.	(Appleton <i>et al.</i> , 2015)		
<i>Sambucus nigra</i> L.	(Šerá, 2017)		
<i>Sesbania grandiflora</i> (L.) Pers.		(Marcar <i>et al.</i> , 1999)	
<i>Tamarindus indica</i> L.	(Dagar <i>et al.</i> , 2001; Tomar <i>et al.</i> , 1998)		
<i>Tamarix aphylla</i> (L.) H.Karst.			(Marcar <i>et al.</i> , 1999)
<i>Tamarix articulata</i> Vahl			(Gill y Abrol, 1991; Marcar <i>et al.</i> , 1999; Tomar y Gupta, 1985)
<i>Tamarix chinensis</i> Lour.			(Zhang, 2014)
<i>Taxodium distichum</i> (L.) Rich.	(Appleton <i>et al.</i> , 2015)		

CAPÍTULO I. EL DESAFÍO PARA ESTABLECER ESPECIES ARBÓREAS EN SUELOS SALINOS DEL EX-LAGO DE TEXCOCO

1.1 RESUMEN

Dada 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 valores menores 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.

1.2 ABSTRACT

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 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.

1.3 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, 2019), dejó expuesto 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- Santiago y Barbara-Galdámez, 2019), alta retención de formas inorgánicas de nitrógeno (Vega-Jarquín, García-Mendoza, Jablonowski, Luna-Guido y Dendooven, 2003) y la heterogeneidad de horizontes derivados de sedimentos con inestabilidad físico-mecánica (Arce *et al.*, 2019; Carranza-Edwards, 2018; Huez-López, Ortega-Escobar, Ramírez-Ayala y Rone-Puello, 1989).

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 de los géneros como *Casuarina*, *Tamarix* y *Eucalyptus* (Ikkonen, García-Calderón, Ibáñez-Huerta, Etchevers-Barra y Krasilnikov, 2018; Soto-Coloballes, 2019). 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.

1.4 MATERIALES Y MÉTODOS

1.4.1 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, a una altitud de 2237 msnm, 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 1.b y 1.e). Las dimensiones de estas fueron de 0.60 x 1 m de diámetro y profundidad, mientras que las cepas testigo comunes se realizaron con dimensiones de 0.4 x 0.4 m respectivamente (Figura 1.c y 1.d). La separación entre cepas tratamiento fue de 2.5 m y dispuestas en marco real.



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, y f) plantas establecidas.

La plantación se realizó en julio del 2019 (Figura 1.f) 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 Schltld. de dos años; *P. leiophylla* Schiede ex Schltld. & 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). 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).

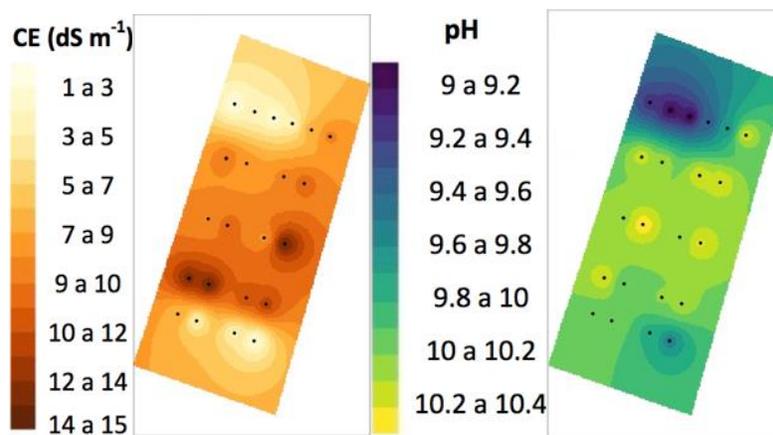


Figura 2. Variabilidad espacial inicial de pH y CE en la parcela de estudio. Los contornos de cada variable se interpolaron con el método de la distancia inversa ponderada. Las imágenes se reprodujeron con la librería gstat del paquete R (R Core Team, 2020).

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 1.a). 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.

1.4.2 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 2) y en relación 1:5. Se determinó una alta presencia de sodio (Na^+) y cloro (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 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.

Cuadro 2. Características químicas del sitio (valores medidos del extracto de saturación)

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

1.4.3 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: $CHR = ((Pf - Ps) * 100) / (Pt - Ps)$.

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 volvieron a tener rebrotes de hojas en su siguiente ciclo de desarrollo.

1.4.4 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).

1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.5.1 Evaluación de las cepas con sustrato alternativo (CSA) respecto al suelo salino sódico (SSS)

En general, todas las variables mostraron valores significativamente menores ($p < 0.001$) en las CSA respecto al SSS (Cuadro 3). Llama la atención el alto contenido volumétrico de humedad del suelo SSS comparado con CSA ($P < 0.001$) lo que podría explicarse por la elevada concentración de sales (Cuadro 3). Las cantidades altas de sales pueden ocasionar una sobreestimación de los resultados de humedad registrados con el TDR (Benor, Levy, Mishael y Nadler, 2013). Así también, otras variables como la textura, la estructura, sales solubles, temperatura, contenido hídrico y la densidad pudieron afectar las mediciones del TDR (Tan, Wu, Huang, Wu y Zeng, 2017). Por otro lado, la materia orgánica contenida en CSA favoreció una menor resistencia mecánica ($p < 0.001$) (Cuadro 3). 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. El pH fue significativamente menor ($p < 0.001$) en CSA (8.99 ± 0.17), manteniendo la condición de alcalinidad en ambos casos.

Cuadro 3. Medidas de valor promedio y desviación estándar de todas las cepas (SSS y CSA) durante todo el tiempo de experimentación.

Condición	RM * (MPa)	CVH ** (cm ³ cm ⁻³)	pH **	CE _{1:5} ** (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 ($P < 0.05$).

1.5.2 pH en cepas con sustrato alternativo (CSA)

Debido a que el promedio del pH y la CE de las CSA en todos los bloques fue menor al SSS ($P < 0.001$), 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 4 muestra que a los 100 y 210 días el pH de las CSA tuvo 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 4). 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, Gutiérrez, Ortiz y Gómez, 2000).

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 diferentes formas de sodio presentes en el lugar (Na_2CO_3 y NaCl), aumentando la proporción del sodio intercambiable, así como, el proceso de hidrólisis del sodio intercambiable y como consecuencia el pH (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). 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.

Cuadro 4. pH de CSA (donde están establecidas las diferentes especies de árboles) y en SSS en tres periodos (100, 210 días y 280 días)

Sitio	pH			CE (dS m ⁻¹)	
	100 días *	210 días**	280 días**	100 días **	280 días **
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. pseudostrobus</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 ($p < 0.05$). Los datos representan valores medios y desviación estándar.

1.5.3 CE en cepas con sustrato alternativo (CSA)

La CE promedio en CSA (< 3.16 dS m⁻¹) fue menor ($p < 0.001$) 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. pseudostrobus* (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 4). A partir de estos resultados los riegos programados se aplicaron en las CSA ya sea que tuvieran árboles o no. 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.

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 se suma a otros factores que influyen en la supervivencia y desarrollo de los árboles. 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.

1.5.4 Contenido Hídrico Relativo (CHR)

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 5). 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 (S. Fan *et al.*, 1994; A.-F. Wang *et al.*, 2012)

Cuadro 5. Contenido hídrico relativo por especie en distintas temporadas.

Especie	CHR (%)	
	60 días **	120 días **
<i>P. greggii</i>	75.1 ± 3.96 b	-
<i>P. pseudostrobus</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<0.05). Los datos representan valores medios y desviación estándar.

En *P. guajava* el CHR que presentó a los 60 días fue el más elevado de todas las especies (Cuadro 5) 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). 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% (Luna-Flores, Estrada-Medina, Jiménez-Osornio y Pinzón-López, 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-Murgía y Martínez-Chávez, 2012).

1.5.5 Supervivencia

Después de 280 días de establecer la plantación solo un árbol de *P. pseudostrobus* en SSS sobrevivió. 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. pseudostrobus* en CSA y SSS ocurrió en el día 35 del experimento. La supervivencia en *P. greggii* fue de 0% mientras que en *P. pseudostrobus* 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 la clorosis de las acículas debido a la baja disponibilidad de Fe para las 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 (pH = 8.45 y CE = 2.22 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 pH = 7.8, CE = 0.121 dS m⁻¹ y tener una supervivencia de 52.9% (Sigala-Rodríguez, González-Tagle y Jiménez-Pérez, 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 (pH = 7.5 - 8.4, CE = 0.78 - 10.02 dS m⁻¹, y altas concentraciones de NaCl, Ca y carbonatos), donde la supervivencia de *Acacia nilotica* (L.) Delile fue de 78%, *Cordia sinensis* Lam. 60%, *Dobera glabra* (Forssk.) Juss. ex Poir. 67% y *Salvadora persica* L. 76% (Oba *et al.*, 2001). Mientras que en suelos similares de la 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).

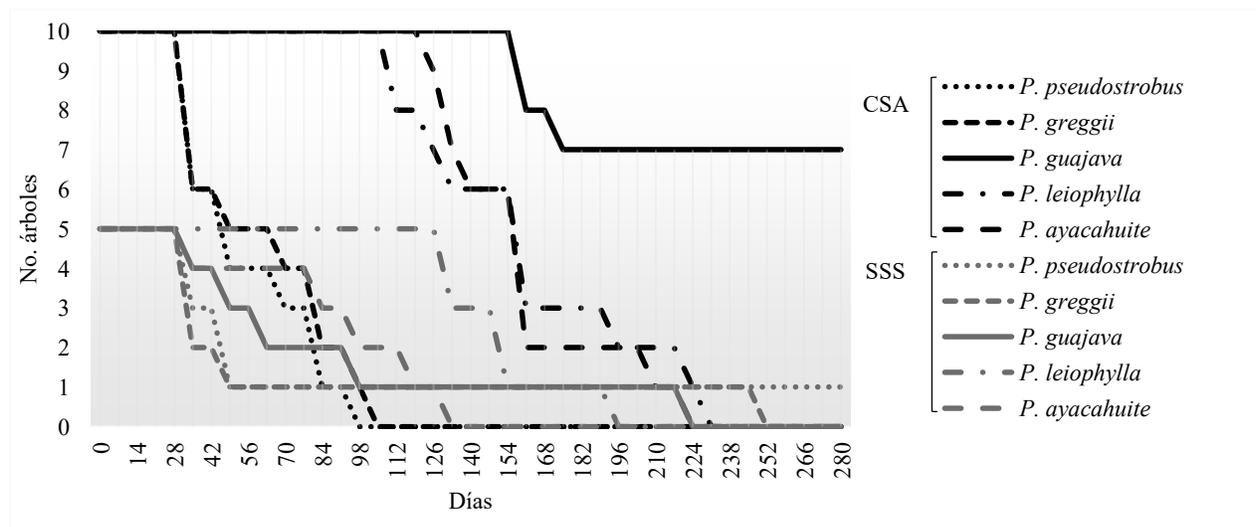


Figura 3. Supervivencia de las especies en CSA y en SSS en el periodo de 280 días.

Otro factor que pudo haber coadyuvado 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.

1.6 CONCLUSIONES

Aunque las especies de pino no lograron subsistir, este trabajo demuestra que existe cierto potencial de lograr el establecimiento de especies forestales en suelo 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.

CAPÍTULO II. EFECTO DE DIFERENTES TIPOS DE SALINIDAD EN EL DESARROLLO DE BRINZALES DE *Pinus greggii* var. *australis*.

2.1 RESUMEN

Se estudió el efecto de sales en el desarrollo de brinzales de *Pinus greggii* var. *australis* durante 172 días. Se probaron los siguientes tipos de salinidad: clorhídrica, sulfática y sulfático-sódica incluyendo un tratamiento testigo de agua destilada. De estas se generaron conductividades eléctricas de 3 dS m⁻¹, 6 dS m⁻¹, 9 dS m⁻¹ y 12 dS m⁻¹. Se analizó la evolución de incremento en diámetro y altura de brinzales, utilizando un análisis estadístico de medidas repetidas en el tiempo. Al final del experimento se compararon los tratamientos mediante la prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$) para el incremento total en diámetro y altura, biomasa radical e índice de calidad de Dickson, y se observaron cortes transversales de raíces de primer orden por microscopía electrónica de barrido (MEB). Se encontró que los tratamientos con concentraciones salinas de 3 dS m⁻¹ para todos los tipos de sales fueron los que menos afectaron el desarrollo de los brinzales, mientras que la salinidad clorhídrica con 12 dS m⁻¹ fue la que más afectó el desarrollo de los brinzales. Por otro lado, las imágenes por MEB mostraron que en la sección de la corteza en la raíz no hubo presencia de gránulos de almidón cuando se trataron con concentraciones salinas de 12 dS m⁻¹, mientras que en el tratamiento testigo sí. Estos resultados sugieren que *P. greggii* var. *australis* tolera concentraciones menores a 3 dS m⁻¹ y su crecimiento se afecta cuando las concentraciones salinas aumentan generando una mala calidad de planta.

Palabras clave: Salinidad, clorhídrica, sulfática, sulfático-sódica, microscopia, almidón.

2.2 ABSTRACT

The effect of salts on the development of *Pinus greggii* var. *australis* saplings was studied during 172 days. Three types of salinity, namely, chloride, sulfate, and sulfate-sodium were tested along with a control treatment with distilled water. Electrical conductivities for each salinity types were 3 dS m⁻¹, 6 dS m⁻¹, 9 dS m⁻¹, and 12 dS m⁻¹. Diameter and height increments were analyzed using time repeated statistical analysis. At the end of the experiment, treatments were compared using Tukey's test ($\alpha = 0.05$) for the total increment in diameter and height, root biomass, and Dickson's quality index, in addition to observing first-order root cross sections by scanning electron microscopy (SEM). Treatments with saline concentration of 3 dS m⁻¹ for all salinity types were those that least affected sapling growth, while chloride salinity with 12 dS m⁻¹ was the one that most affected sapling growth. On the other hand, SEM images showed that no starch granules were present in the root section of the cortex when treated with saline concentration of 12 dS m⁻¹, while they were present in the control treatment. These results suggest that *P. greggii* var. *australis* tolerates saline concentration lower than 3 dS m⁻¹ and its growth is affected when concentrations increase, generating poor plant quality.

Keywords: Salinity, chloride, sulfate, sulfate-sodium, microscopy, starch.

2.3 INTRODUCCIÓN

La salinización afecta tanto tierras agrícolas como forestales (Dagar, Singh y Singh, 2001). En el mundo existen más de mil millones de hectáreas afectadas por salinización (Ivushkin *et al.*, 2019). Se estima que en México hay 2 millones de hectáreas que presentan esta problemática y están distribuidas tanto en ecosistemas naturales (cuencas cerradas, zonas áridas y áreas costeras) como en zonas de regadío (Pla Sentís, 2021), en donde estas últimas son afectadas principalmente por la utilización de aguas subterráneas con un alto contenido de sales que impiden el desarrollo de plantas no tolerantes a esta condición.

La salinidad afecta el crecimiento y rendimiento de los cultivos, y el desarrollo de los árboles (Hayward y Wadleigh, 1949). La tolerancia a la salinidad en las especies se da de manera inter e intraespecífica (Cory y Trione, 1998). Por esta razón, es importante investigar los diferentes tipos y concentraciones de salinidad que pueden tolerar los árboles, en particular en especies arbóreas como *Pinus greggii* Engelm. ex Parlatore; una de las especies más utilizada en las reforestaciones de México (Burney *et al.*, 2015). El conocimiento sobre la tolerancia a la salinidad ayuda a la toma de decisiones en la reforestación. Por ejemplo, se han identificado los umbrales de tolerancia de diversas especies de pinos utilizadas para reforestación de áreas degradadas o en áreas urbanas en China; de tal manera que *Pinus taeda* L. y *P. elliottii* Engelm., toleraran hasta 5 dS m⁻¹ de NaCl (Zhang y Yu, 2019).

De manera experimental, la sal más utilizada para determinar los efectos de salinidad en plantas es el NaCl (Nedjimi, 2017). Sin embargo, pueden existir combinaciones de diferentes sales solubles que expresan diferentes tipos de salinidad como son la clorhídrica, sulfática o sulfático-sódica de acuerdo con la geología y procesos de salinización de cada lugar (Kovda, 1973). Estas sales afectan de manera distinta a las plantas que son expuestas a éstas debido a que generan diferentes presiones osmóticas que dificultan la adsorción de agua (Strogonov, 1962; Can-Chulim *et al.*, 2017).

P. greggii var. *australis* Donahue & López es una especie nativa de México ampliamente utilizada en reforestaciones. Se distribuye en el Centro Este de México en zonas

semiáridas y semitropicales de Puebla, Veracruz, Hidalgo, Querétaro y San Luis Potosí (Hernández-Martínez, López Upton, Vargas Hernandez y Jasso Mata, 2007; Ramírez-Herrera, Vargas-Hernandez y López-Upton, 2005). Es una planta que tolera sequía (López-Upton y Muñoz, 1991), y que se establece en suelos degradados y ligeramente alcalinos (Gómez-Romero *et al.*, 2012; Reyes-Esteves *et al.*, 2022). Existen antecedentes de que *P. greggii* tolera baja salinidad (Mohedano-Caballero, Cetina-Alcalá, Chacalo-Hilu, Trinidad-Santos y González-Cossio, 2005), sin embargo, la respuesta combinada a diferentes tipos de sales y niveles aún requiere más estudios. Árboles de los géneros *Casuarina*, *Eucalyptus* y *Tamarix* son comúnmente propuestos para mejorar las condiciones de suelos salinos del ex-lago de Texcoco. Ante esto, es necesario tener otras opciones de árboles que se utilicen para enriquecer la estructura arbórea en áreas degradadas por salinidad. Este estudio aporta conocimiento adicional sobre la tolerancia de *P. greggii* var. *australis* a diferentes condiciones de salinidad y provee información básica sobre su comportamiento en sustratos afectados por salinidad como las que se presentan en ex-lagos o en regiones áridas.

2.3.1 Objetivos

Evaluar la respuesta en crecimiento de brinzales de *P. greggii* var. *australis* a salinidades clorhídrica, sulfática y sulfático-sódica, con cuatro concentraciones salinas; dado que esta especie es utilizada frecuentemente para reforestaciones de suelos degradados tanto en ecosistemas naturales como urbanos.

2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1 Ubicación del experimento

El experimento fue realizado en un vivero ubicado en Texcoco, Estado de México. Las condiciones de crecimiento fueron bajo malla sombra al 50% a cielo abierto, esto fue para disminuir la condición de estrés por radiación solar y así observar el efecto de los diferentes tipos de sales utilizadas. Los brinzales de *P. greggii* var. *australis* de procedencia desconocida fueron de un año de edad producidos de un vivero de Acaxochitlán, Hidalgo. Las plantas se trasplantaron a bolsas de 1 L y durante dos meses se aplicaron riegos cada 4 días para su aclimatación. Antes de dar inicio al experimento, las bolsas se sellaron con cinta para ducto para evitar fugas al momento de aplicar las sales en solución y los riegos con agua destilada. Una vez selladas, a cada planta se le aplicaron un total 480 mL de solución salina aplicadas en cuatro dosis de 120 mL cada tercer día, las cuales se establecieron a partir de pruebas de saturación para el sustrato con la finalidad de que las bolsas fueran saturadas de sales en solución.

2.4.2 Tratamientos utilizados

Los tratamientos consistieron en tres tipos de salinidades (TS) a partir de las siguientes relaciones aniónicas: clorhídrica (Cl), $\text{Cl}^-/\text{SO}_4 = 2.5$, mezcla de NaCl y MgSO_4 ; sulfática (S), $\text{Cl}^-/\text{SO}_4 = 0.15$, mezcla de NaCl y MgSO_4 ; sulfático-sódica (SS), $\text{HCO}_3^-/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}) = 2.0$, mezcla de NaHCO_3 , MgCl_2 y Na_2SO_4 . El tratamiento testigo (T), consistió solo de agua destilada. Las concentraciones salinas de los TS se prepararon hasta alcanzar una conductividad eléctrica (CE) de 3, 6, 9 y 12 dS m^{-1} , con base a la metodología propuesta por Arinushkina (Kovda, 1947). El diseño utilizado en el experimento fue en bloques al azar generalizados, donde los bloques fueron los TS y los tratamientos fueron las concentraciones salinas (CS) y el tratamiento con agua destilada. Para cada combinación de TS y CS, así como del testigo se tuvieron cuatro repeticiones. Las variables de crecimiento de cada brinjal se midieron durante 172 días.

2.4.3 Manejo del experimento

Una vez aplicados los tratamientos, se realizaron riegos con agua destilada cada tercer día para reponer el agua perdida por evapotranspiración y mantener la concentración de sales en el sustrato de las bolsas. Para determinar el agua perdida se midió la humedad del sustrato con un TDR 300 Fieldscout y el peso de las bolsas con árboles con una báscula Ohaus Scout Pro-SP2001.

El experimento se realizó entre las fechas del 15 de noviembre de 2019 el cinco de mayo de 2020. Cada mes se midió el diámetro a la base del tallo y altura del tallo. Al finalizar el experimento se utilizó un método destructivo para evaluar el peso fresco y seco de la raíz (PFR, PSR), peso fresco y seco de la parte aérea (PFA, PSA), diámetro y altura finales. A los 172 días, cuando finalizó el experimento, se calculó el incremento en diámetro (ID_{172}) y en altura (IA_{172}), la biomasa radical y el índice de Dickson (Silva *et al.*, 2018).

Con la finalidad de determinar el efecto de los diferentes tipos de salinidad en las raíces se recolectaron tres muestras de raíces nuevas (de primer orden) del testigo y de cada tipo de salinidad a 12 dS m^{-1} . Se observó la superficie de cortes transversales de las raíces por medio de microscopía electrónica de barrido (MEB). De las muestras se cortaron segmentos de raíz de 3 mm de longitud utilizando navajas de doble filo, se fijaron en soluciones de glutaraldehído al 3% en amortiguador de fosfatos Sorenses (0.1 M, pH 7.2) por 78 h a 4 °C. Posteriormente se postfijaron en tetraóxido de osmio (1%) en agua por 1 h. La deshidratación de las muestras se realizó en una serie graduada de etanol, 40 min en cada cambio, para después pasar al secado de punto crítico con CO_2 (Samdri-780 A, USA). Se montaron en porta muestras de cobre y el recubrimiento de las muestras fue con una aleación oro:paladio (80:20) por pulverización catódica (Ion Sputter JFC-1100, Jeol, Fine Coat, Japan). Las superficies de las muestras se observaron con un Microscopio Electrónico de Barrido JEOL JSM-6390 (JEOL, Japón) operado a 10 kV (López-Mora, Gutiérrez-Martínez, Bautista-Baños, Jiménez-García y Zavaleta-Mancera, 2013).

2.4.4 Análisis estadístico

Se verificó que los datos cumplieran con el supuesto de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilks, cuando no fue el caso se usaron transformaciones de Cox-Box (LaLonde, 2012). La comparación de las tendencias en el tiempo de los tratamientos se realizó mediante un análisis de varianza de medidas repetidas en el tiempo. En este análisis se verificó el supuesto de esfericidad utilizando el criterio de Mauchly para determinar si se utilizaba el estadístico Lambda de Wilks como indicador de la significancia de los efectos de tratamiento.

Se compararon las tendencias del incremento en diámetro cada 30 días (ID_{30}) e incremento en altura cada 30 días (IA_{30}) con respecto al tipo de salinidad y concentración. Como diferencia del tiempo inicial y final (después de 172 días del experimento) se calculó el incremento en diámetro (ID_{172}) y el incremento en altura (IA_{172}). Además de estos dos, la biomasa radical (BR_{172}) e índice de calidad de Dickson (ICD_{172}) a 172 días se analizaron comparando los tratamientos contra el testigo mediante la prueba de Tukey ($\alpha= 0.05$).

2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1 Efecto en el incremento en diámetro (ID₃₀) y altura (IA₃₀) en el tiempo

El análisis de medidas repetidas indicó que el índice más apropiado para valorar la significancia de los factores fue el de Lambda de Wilks. Para este análisis estadístico no fue incluido el tratamiento testigo debido a que solo se necesitaba observar el efecto entre las concentraciones y tipos de salinidad, además de que la tendencia del tratamiento testigo fue siempre estadísticamente diferente a los demás tratamientos. Se encontró evidencia significativa de cambios a través del tiempo para las variables diámetro y altura ($p < 0.0001$). La única interacción estadísticamente significativa para el diámetro y altura fue Tiempo*CS, indicando mayor importancia en concentración salina que en tipo de salinidad. Así también, se encontró que, para el diámetro, al menos una combinación de tratamiento tuvo un efecto distinto a las demás a través del tiempo ($p = 0.0469$) (Cuadro 6).

Cuadro 6. Significancia de efectos en el tiempo y sus interacciones para el diámetro y altura de plantas de *P. greggii* var. *australis* sometidas a distintas salinidades por 172 días.

Hipótesis de no efecto	Lambda de Wilks	
	ID ₃₀	IA ₃₀
Tiempo	< 0.0001	< 0.0001
Tiempo*TS	0.0825	0.1655
Tiempo*CS	0.0001	0.0220
Tiempo*CS*TS	0.0469	0.6194

TS = Tipo de salinidad, CS = Concentración salina

Los análisis de varianza generados para cada 30 días (Cuadro 7) indicaron que a partir de los 60 días las concentraciones salinas y al menos una combinación de tipo de

salinidad y concentración presentaron un efecto diferente a las demás en el desarrollo del diámetro ($p < 0.001$). Para el incremento en altura solo se observaron efectos con las concentraciones salinas y estos se presentaron a partir de los 120 días (Cuadro 7).

Cuadro 7. Significancia de efectos para los tratamientos a distintos días de establecido el experimento a distintas salinidades por 172 días en plantas de *P. greggii* var. *australis* en las variables diámetro y altura ($p < 0.05$).

Día	ID ₃₀			IA ₃₀		
	TS	CS	TS*CS	TS	CS	TS*CS
	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F	Pr > F
30	0.9144	0.0979	0.1025	0.0954	0.6484	0.2051
60	0.4478	0.0006	0.0192	0.0852	0.1114	0.1890
90	0.2745	< 0.0001	0.0059	0.1333	0.1198	0.5629
120	0.3644	< 0.0001	0.0035	0.2025	0.0376	0.9576
150	0.1901	< 0.0001	0.0067	0.1056	0.0007	0.7357

TS = Tipo de salinidad, CS = Concentración salina, y TS*CS = interacción tipo de salinidad y concentración salina.

2.5.2 Efectos en ID₁₇₂, IA₁₇₂, BR₁₇₂ e ICD₁₇₂ al final del experimento

Todos los análisis de varianza para las distintas variables evaluadas mostraron diferencias significativas en las concentraciones salinas ($p < 0.0001$). Para el tipo de salinidad solo en IA₁₇₂ ($p < 0.05$) y BR₁₇₂ ($p = 0.0004$) se encontraron diferencias significativas. Las interacciones no fueron significativas para ninguna variable respuesta (Cuadro 8).

Cuadro 8. Valores de probabilidad en el análisis de varianza de las variables evaluadas después de 172 días de plantas de *P. greggii* var. *australis* sometidas a distintas concentraciones y tipos de salinidad.

Factor	gl	ID ₁₇₂	IA ₁₇₂	BR ₁₇₂	ICD ₁₇₂
CS	4	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
TS	2	0.2560	0.0337	0.0004	0.1077
TS*CS	6	0.2116	0.7426	0.2746	0.2361

gl = grados de libertad, ID₁₇₂ = Incremento en diámetro, IA₁₇₂ = Incremento en altura, BR₁₇₂ = Biomasa radical, ICD₁₇₂ = Índice de calidad de Dickson, todos al final del experimento (172 días).

2.5.3 Comparación de medias para tipos de salinidad y concentraciones salinas al final del experimento

2.5.3.1 Incremento en diámetro (ID₁₇₂)

Las salinidades clorhídrica, sulfática y sulfático-sódica presentaron un efecto similar en el desarrollo del diámetro al final del experimento y fueron diferentes a los tratamientos testigo, los cuales presentaron mayores incrementos en diámetro (Cuadro 9).

Cuadro 9. Comparación de medias entre el testigo y los tratamientos con diferentes tipos de salinidad después de 172 días en plantas de *P. greggii* var. *australis* (valores medios y error estándar).

Tipos de salinidad	ID ₁₇₂ (mm)	IA ₁₇₂ (cm)	BR ₁₇₂ (g)	ICD ₁₇₂ media
Testigo	3.95 ± 0.31 ^a	18.00 ± 1.09 ^a	15.03 ± 1.84 ^a	4.23 ± 0.58 ^a
SS	2.84 ± 0.24 ^b	13.04 ± 1.26 ^a	9.49 ± 0.74 ^b	2.76 ± 0.29 ^b
S	2.35 ± 0.21 ^b	18.06 ± 2.45 ^a	9.87 ± 0.79 ^b	2.65 ± 0.19 ^b
Cl	2.69 ± 0.42 ^b	13.59 ± 1.67 ^a	6.79 ± 0.78 ^c	2.26 ± 0.29 ^b

SS = Sulfático-sódica, S = Sulfática, Cl = Clorhídrica; Variables evaluadas después de 172 días: ID₁₇₂ = Incremento en diámetro, IA₁₇₂ = Incremento en altura, BR₁₇₂ = Biomasa radical, ICD₁₇₂ = Índice de calidad de Dickson. Letras distintas entre filas indican diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

Los brinzales testigo y la concentración 3 dS m⁻¹ presentaron efectos similares en el diámetro, con los mayores incrementos al término del experimento (Cuadro 10). Los tratamientos con las concentraciones salinas más altas (9 dS m⁻¹ y 12 dS m⁻¹) tuvieron los incrementos en diámetro más bajos y fueron significativamente distintos al testigo y al tratamiento de 3 dS m⁻¹. En general, se observó que el diámetro de los árboles tiende a disminuir conforme aumenta la concentración salina (Figura 4a).

Cuadro 10. Comparación de medias entre el testigo y las distintas concentraciones salinas después de 172 días en plantas de *P. greggii* var. *australis* (valores medios y error estándar).

Concentración salina	ID ₁₇₂ (mm)	IA ₁₇₂ (cm)	BR ₁₇₂ (g)	ICD ₁₇₂ media
Testigo	3.95 ± 0.31 ^a	18.00 ± 1.09 ^a	15.03 ± 1.84 ^a	4.23 ± 0.58 ^a
3 dS m ⁻¹	3.68 ± 0.34 ^a	19.65 ± 1.57 ^a	10.72 ± 0.86 ^a	3.24 ± 0.34 ^{ab}
6 dS m ⁻¹	3.11 ± 0.19 ^{ab}	17.64 ± 2.62 ^a	10.34 ± 0.68 ^{ab}	3.07 ± 0.18 ^{ab}
9 dS m ⁻¹	2.43 ± 0.20 ^b	14.48 ± 1.58 ^{ab}	7.17 ± 0.68 ^{bc}	2.15 ± 0.19 ^b
12 dS m ⁻¹	1.29 ± 0.19 ^c	7.83 ± 1.23 ^b	6.64 ± 1.01 ^c	1.77 ± 0.25 ^b

Variables evaluadas después de 172 días: ID₁₇₂ = Incremento en diámetro, IA₁₇₂ = Incremento en altura, BR₁₇₂ = Biomasa radical, ICD₁₇₂ = Índice de calidad de Dickson. Letras distintas entre filas indican diferencias significativas ($\alpha = 0.05$).

2.5.3.2 Incremento en altura

Los distintos tipos de salinidad no mostraron diferencias significativas entre éstas. Sin embargo, los valores promedio de IA₁₇₂ en los brinzales testigo fueron mayores a los tratados con soluciones de cloro (Cuadro 9).

Al comparar únicamente las concentraciones salinas, los tratamientos testigo, 3 dS m⁻¹ y 6 dS m⁻¹ presentaron efectos estadísticos similares y fueron significativamente distintos al tratamiento de 12 dS m⁻¹ (Cuadro 10). La media del tratamiento de 3 dS m⁻¹ fue ligeramente superior al testigo. En general hubo un efecto decreciente en la altura de los brinzales conforme la concentración salina aplicada aumentó (Figura 4b).

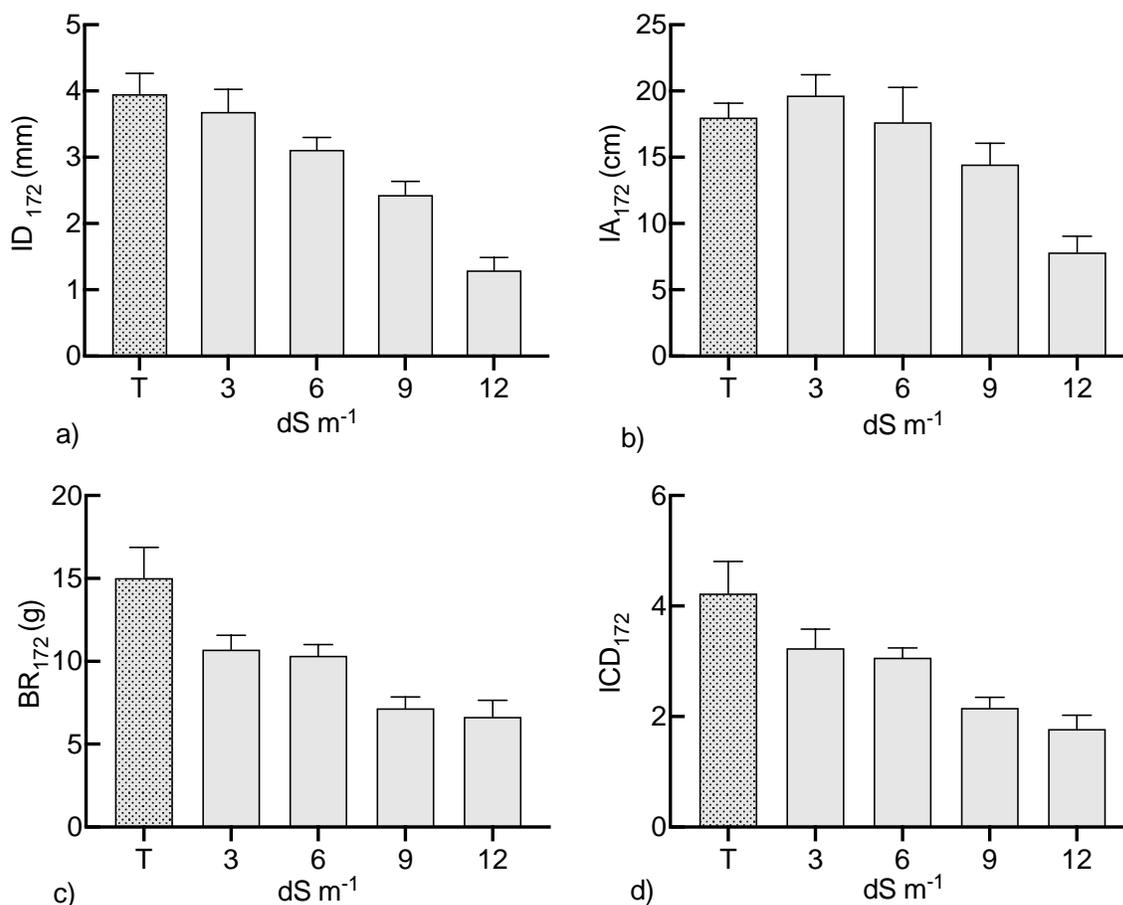


Figura 4. Comportamiento de las diferentes variables evaluadas al final del experimento de plantas de *P. greggii* var. *australis* de acuerdo con las concentraciones salinas presentes en todos los tipos de salinidad. a) ID₁₇₂ = Incremento en diámetro, b) IA₁₇₂ = incremento en altura, c) BR₁₇₂= Biomasa radical, y d) ICD₁₇₂ = Índice de calidad de Dickson. La dispersión indicada en las barras corresponde al error estándar.

2.5.3.3 Biomasa radical (BR₁₇₂)

Los tipos de salinidad sulfática y sulfático-sódica presentaron efectos similares y sus medias fueron significativamente menores al tratamiento testigo y mayores a la salinidad clorhídrica (Cuadro 9). Esta última fue la que más afectó la biomasa radical de los brinzales.

En las concentraciones salinas los brinzales tratados con 3 dS m⁻¹ tuvieron valores estadísticos similares al testigo (Cuadro 10). Las plantas bajo concentraciones salinas de 9 dS m⁻¹ y 12 dS m⁻¹ presentaron un menor desarrollo radical respecto a los brinzales testigo y 3 dS m⁻¹. La producción de biomasa radical presentó un gradiente, en donde, las menores concentraciones produjeron una mayor cantidad de biomasa radical y las concentraciones mayores, menor cantidad (Figura 4c).

2.5.3.4 Índice de calidad de Dickson (ICD₁₇₂)

Todos los tipos de salinidad tuvieron efectos similares y presentaron valores del índice de calidad de Dickson bajos en comparación con las plantas testigo (Cuadro 9). Los tratamientos con concentraciones salinas de 9 dS m⁻¹ y 12 dS m⁻¹ fueron los que tuvieron un efecto más adverso en el índice de calidad (Cuadro 10). Al igual que en las otras variables evaluadas, se observó que con el aumento de la concentración salina se afectaba la calidad de la planta (Figura 4d).

2.5.3.5 Observación en microscopía electrónica de barrido (MEB)

Al analizar el tejido en cortes de la raíz para los tres tipos de salinidad (Figura 5a, b, c) se determinó una mayor presencia de gránulos de almidón en las plantas testigo (Fig. 5d) en comparación con las plantas que crecieron en concentraciones de 12 dS m⁻¹.

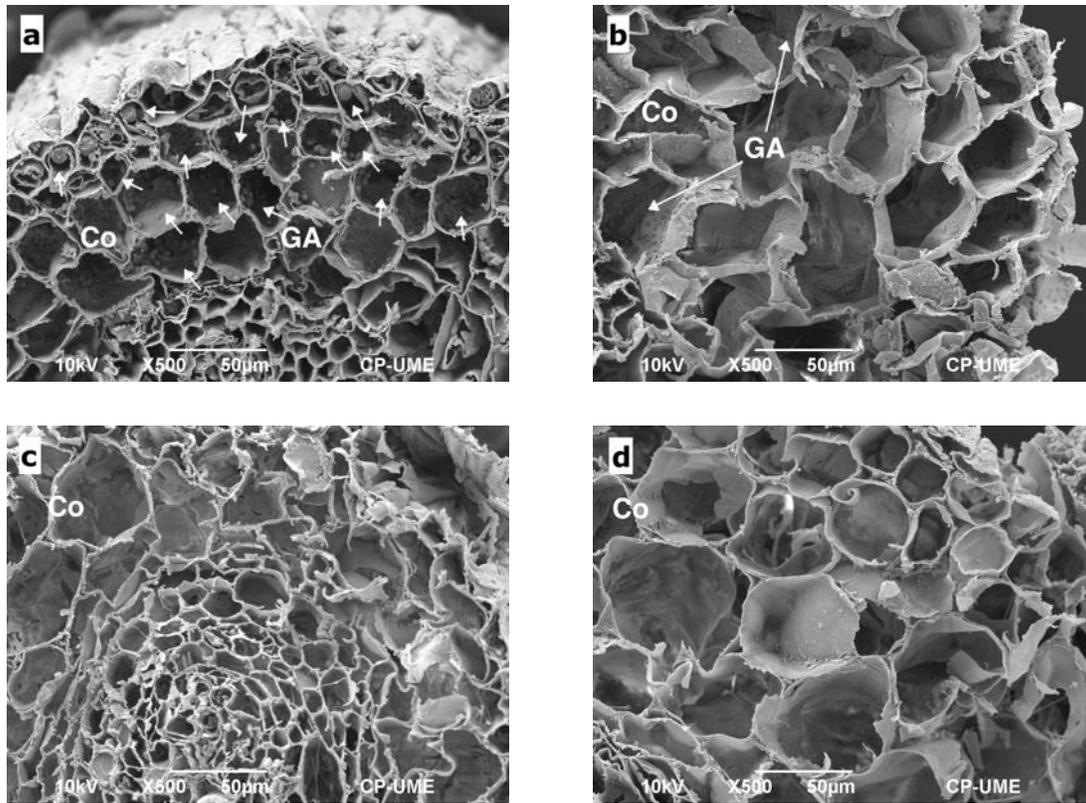


Figura 5. Micrografías por microscopía electrónica de barrido (MEB) de cortes transversales de raíces de *P. greggii* var. *australis*. En la zona de la corteza se observa la presencia o ausencia de gránulos de almidón para los distintos tratamientos de tipos de salinidad con 12 dS m⁻¹. a) tratamiento Testigo, b) sulfático-sódica, c) sulfática, d) clorhídrica. Co = Zona de corteza de la raíz, GA = gránulos de almidón (las flechas indican las zonas con presencia de gránulos de almidón).

2.5.4 Discusión

En este estudio se encontró que la concentración salina, más que el tipo de salinidad, fue el factor más determinante en el desarrollo de los brinzales de *P. greggii* var. *australis*, principalmente la combinación de salinidad clorhídrica con una concentración de 12 dS m⁻¹. Los efectos de las concentraciones salinas se observaron en el desarrollo del diámetro en el mes dos, mientras que para el incremento en altura los efectos se reflejaron hasta el mes cuatro. Esta exposición de los árboles a elevadas concentraciones salinas provocó con el tiempo el desarrollo de plantas con ICD₁₇₂ bajos. Resultados similares han sido encontrados en plántulas de *Annona squamosa* L. donde su ICD₁₇₂ se redujo cuando las plantas fueron irrigadas con soluciones de 5 dS m⁻¹ (Silva *et al.*, 2018). Aun cuando los árboles toleraron moderadas concentraciones salinas, se observó la presencia de necrosis en las puntas de las acículas más viejas en la parte baja del tallo a partir de los 30 días y fue más evidente en los tratamientos de salinidad clorhídrica con 9 dS m⁻¹ y 12 dS m⁻¹.

El tiempo de respuesta a la salinidad en especies leñosas es variable y aunque no lleguen a mostrar síntomas visuales por intoxicación, la reducción en la tasa de crecimiento es una respuesta inequívoca de la exposición de la planta al estrés salino (Hayward y Wadleigh, 1949). Esto provoca la acumulación de sales en sus tejidos (Mass, 1987), influye en la disminución de la fotosíntesis y propicia la aparición gradual de clorosis en las hojas o acículas de las plantas (Luangjame, 1990) provocando la muerte de estos tejidos.

Se ha encontrado que *Pinus caribaea* var. *hondurensis* W. H. Barrett & Golfari tarda cinco semanas en mostrar necrosis en sus acículas después de aplicar tratamientos de NaCl con concentraciones de hasta a 10 dS m⁻¹; mientras que plántulas de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. y *E. pilularis* Sm. muestran daño foliar por sales en solo tres días (Sun y Dickinson, 1993). En plántulas de *Pinus pinea* L. la aplicación de NaCl a 10 dS m⁻¹ provocó la aparición de necrosis 38 días después en las puntas de las acículas más viejas, afectando también el desarrollo de la raíz y el crecimiento relativo del árbol (Mass, 1987; Khaldi, Ammar, Woo, Akrimi y Zid, 2011).

En general, en la mayoría de los parámetros físicos evaluados (ID₁₇₂, BR₁₇₂, e ICD₁₇₂) se observó que el desarrollo de la planta sigue una tendencia de crecimiento inverso a la concentración salina aplicada (Figura 4), lo cual, también ha sido reportado por distintos autores (Sá *et al.*, 2015; Andrade, Pereira, Morais, Silva y Barbosa Neto, 2018; Silva *et al.*, 2018; Sánchez-Bernal *et al.*, 2020) y para diferentes especies como *A. squamosa* y *P. pinea* (Khaldi *et al.*, 2011).

La media del IA₁₇₂ con la concentración de 3 dS m⁻¹ fue ligeramente superior al tratamiento testigo. Resultados similares se han encontrado en especies como: *Acacia auriculiformis* A. Cunn. ex Benth., *Callistemon lanceolatus* Sweet, *Casuarina equisetifolia* L., *Pongamia pinnata* (L.) Pierre y *Cassia fistula* L., en donde al aplicar concentraciones de hasta 1.5 dS m⁻¹ los árboles presentaron incrementos en altura mayores que los testigos durante los primeros meses (Gupta, Dubey, Kaur y Choudhary, 2020). De igual manera, en *Eucalyptus argophloia* Blakely y *E. grandis* W. Hill, los cuales, al ser tratados con NaCl y concentraciones de hasta 5 dS m⁻¹ también tuvieron mayores alturas respecto a sus testigos, y además, reflejaron su alta capacidad de tolerancia a la salinidad (Sun y Dickinson, 1993). Por otro lado, hay especies que al ser tratadas con concentraciones salinas similares a las utilizadas en este experimento (3 dS m⁻¹), su capacidad de crecimiento en altura se ve afectada, tal es el caso de: *A. auriculiformis* Benth., *C. lanceolatus* Sweet, *C. equisetifolia* L., *P. pinnata* (L.) Pierre, *C. fistula* L. (Gupta *et al.*, 2020), *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. y *Gliricidia sepium* (Jacq.) Walp. (Sánchez-Bernal *et al.*, 2020).

Al aplicar bajas concentraciones salinas (3 dS m⁻¹) el desarrollo de las raíces se vio poco afectada. En plantas que toleran la salinidad como *Prosopis alba* Griseb., se encontró que al aplicar concentraciones de NaCl en hasta 29.4 dS m⁻¹, la producción de biomasa radical fue similar al obtenido en su tratamiento testigo (Meloni, Gulotta, Martínez y Oliva, 2004). Cuando una planta tiene la capacidad de tolerar bajas concentraciones salinas esta suele ser más eficiente al momento de absorber agua y nutrientes (Gorham, Jones y McDonnell, 1985). De esta forma, el Na⁺ y Cl⁻ acumulado en el tallo y las raíces puede ser utilizado por las plantas como un soluto que se compartimenta en las vacuolas y los endosomas, facilitando el ajuste osmótico, la absorción de agua hacia las células y la

expansión celular en la planta (Blumwald, 2000; Hasegawa, 2013). De hecho, la compartimentación del Na^+ se debe a que este es químicamente similar al K^+ y lo puede reemplazar en diversas funciones metabólicas, como por ejemplo, en los sitios de absorción de la raíz (Trejo-Téllez, Gómez-Merino y Alcántar-González, 2016). La capacidad de *P. greggii* var. *australis* para tolerar bajas concentraciones salinas durante los 172 días de evaluación, puede deberse a que compartimentó los iones tóxicos presentes en el medio y realizó un ajuste osmótico adecuado, lo cual es similar a los resultados encontrados para *P. pinea* bajo estrés salino de NaCl (Khaldi *et al.*, 2011).

Por otro lado, el bajo crecimiento en el diámetro, la altura y la producción de raíces fue producto del desbalance nutricional causado por el efecto de las altas concentraciones salinas (NaHCO_3 , Na_2SO_4 , Na^+ y Cl^-) presentes en los tipos de salinidades (Prisco, Gomes-Filho y Miranda, 2016; Nedjimi, 2017; Andrade *et al.*, 2018), los cuales disminuyen la absorción de potasio, nitrato y fósforo (Gorham *et al.*, 1985), y generan deficiencias de Ca^{2+} y Mg^{2+} (Mass, 1987), así como de carbohidratos (Kozlowski, 2000).

Esta deficiencia de carbohidratos en forma de almidones se observó en imágenes MEB (Figura 5), donde hubo poca o nula presencia de gránulos de almidón en las células de la corteza de las raíces tratadas con 12 dS m^{-1} , mientras que en la raíz testigo, la cantidad de gránulos de almidón fue mayor. De acuerdo con López-Ríos (2012) en condiciones normales el tejido de esta zona puede almacenar abundante parénquima de reserva y acumular materiales como gránulos de aleurona, almidones, azúcares en solución, entre otros. En *Pinus radiata* D. Don se ha encontrado que la acumulación de almidón en la corteza de la raíz puede influir en la formación de nuevos primordios radiculares (Li y Leung, 2000).

La ausencia de gránulos de almidón también la pueden ocasionar agentes patógenos. Por ejemplo, en *Citrus sinensis* L. Osbeck observó la ausencia de gránulos de almidón en las células de la corteza cuando las plantas estuvieron bajo estrés por una bacteria (*Candidatus Liberibacter asiaticus*) (Kumar, Kiran y Etxeberria, 2018) En este estudio se descarta la presencia de bacterias ya que ninguna de las plantas testigo mostró evidencia de enfermedad. En algunas variedades de *Pisum sativum* L. se ha encontrado un menor contenido de almidones en los cloroplastos cuando son tratadas con NaCl (Hernández,

Olmos, Corpas, Sevilla y del Río, 1995). Esto permite suponer que las raíces de *P. greggii* al estar expuestas a altas concentraciones de salinidad no acumularon gránulos de almidón, y por tanto, esta escasez es un factor más que impidió una mayor producción de raíces.

Aunque no fueron tan marcados los efectos entre los tipos de salinidad, se observó que la salinidad clorhídrica tiende a reducir más los parámetros de la planta evaluados. Mass (1987) menciona que las especies leñosas son más susceptibles a la toxicidad por Cl^- , el cual se encuentra presente en mayor cantidad en el tipo de salinidad clorhídrica, además, se ha encontrado que el NaCl es más tóxico que la salinidad sulfático sódica en germinaciones de *Pinus halepensis* Mill. (Nedjimi, 2017).

2.6 CONCLUSIÓN

El principal factor que afectó el desarrollo de *P. greggii* var. *australis* fue la concentración salina. La concentración 3 dS m⁻¹ fue todavía adecuada para mantener un buen desempeño en esta variedad de pino, más allá de esta concentración el brinjal se ve afectado en raíz, diámetro y altura, provocando una mala calidad de planta. Así también, la salinidad clorhídrica fue la que tuvo el mayor impacto sobre el desarrollo de la planta. Los hallazgos anteriores rechazan la hipótesis de que la especie en estudio responde de manera semejante a tipos de salinidad y concentraciones salinas. Por otro lado, a pesar de que durante cinco meses el árbol pudo tolerar estas condiciones salinas, es necesario realizar pruebas de campo bajo estas condiciones de tolerancia para observar su supervivencia. Finalmente, se observó que cuando *P. greggii* var. *australis* estuvo expuesta a condiciones de estrés por elevadas concentraciones, la acumulación de almidones en las raíces se vio afectada y esto se suma a los diversos factores que impiden el desarrollo de la planta.

CONCLUSIONES GENERALES

Las arduas condiciones que en campo enfrentaron las especies arbóreas en este estudio como: viento, radiación solar, anegamientos, acumulación de arcillas en la parte superior del suelo, entre otras, dificultaron su establecimiento. La sustitución del suelo salino por un sustrato alternativo en cepas con un metro de profundidad ayudó a que la CE, el pH y la resistencia mecánica del suelo fueran menores a los que presenta el suelo salino. A pesar de esta mejora, las distintas especies de pino no se lograron establecer, aunque, la especie tolerante *P. guajava* tuvo más éxito y se mantuvo por más tiempo, indicando la posibilidad de establecer especies tolerantes en este tipo de cepas con sustrato alternativo. Así también, la exploración en las concentraciones y tipos de salinidad en *P. greggii* var. *australis* permitió conocer que este árbol puede desarrollarse adecuadamente en rangos de concentración entre 0 y 3 dS m⁻¹ y en cualquiera de los tres tipos de salinidad utilizadas. Mas allá de este rango, el desarrollo de *P. greggii* var. *australis* se ve afectado y la calidad de la planta en brinzales de acuerdo con el índice de Dickson tiende a disminuir. De esta forma, los rangos de tolerancia encontrados ayudan a entender como *P. greggii* var. *australis* puede establecerse en sitios con suelos deteriorados, con escasa materia orgánica y climas desérticos, ya que los tipos de salinidad aplicados actúan de forma similar a un estrés hídrico debido a la retención de moléculas de agua por las sales presentes en el sustrato. En general es importante explorar la tolerancia a distintas concentraciones y tipos de salinidad en especies arbóreas a tener en cuenta para habilitar áreas con este tipo de problemas, además, la cepa utilizada en este experimento se considera adecuada para establecer especies tolerantes a la salinidad.

LITERATURA CITADA

- Akeroyd, M. D., Tyerman, S. D., Walker, G. R., and 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)
- Alcocer, J., and Williams, W. D. (1996). Historical and recent changes in Lake Texcoco, a saline lake in Mexico. *International Journal of Salt Lake Research*, 5(1), 45–61. <https://doi.org/10.1007/BF01996035>
- Allakhverdiev, S. I., Sakamoto, A., Nishiyama, Y., Inaba, M., and Murata, N. (2000). Ionic and osmotic effects of NaCl-induced inactivation of photosystems I and II in *Synechococcus* sp. *Plant Physiology*, 123(3), 1047–1056. <https://doi.org/10.1104/pp.123.3.1047>
- Amtmann, A. (2009). Learning from evolution: Thellungiella generates new knowledge on essential and critical components of abiotic stress tolerance in plants. *Molecular Plant*, 2(1), 3–12.
- Andrade, F. H. A. de, Pereira, W. E., Morais, R. R., Silva, A. F. da, and Barbosa Neto, M. A. (2018). Effect of phosphorus application on substrate and use of saline water in sugar-apple seedlings. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 48(2), 190–199. <https://doi.org/10.1590/1983-40632018v48i2a035>
- Appleton, B., Greene, V., Smith, A., Frech, S., Kane, B., Fox, L., Downing, A., and Gilland, T. (2015). Trees and shrubs that tolerate saline soils and salt spray drift. *Virginia Cooperative Extension Publication*, 430(031), 1–9.
- Arce, J. L., Layer, P. W., Macías, J. L., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F. J., Benowitz, J., and 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>
- Bader, B., Aissaoui, F., Kmicha, I., Salem, A. Ben, Chehab, H., Gargouri, K., Boujnah, D., and Chaieb, M. (2015). Effects of salinity stress on water desalination, olive tree (*Olea europaea* L. cvs 'Picholine', 'Meski' and 'Ascolana') growth and ion accumulation. *Desalination*, 364, 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.01.002>
- Benor, M., Levy, G. J., Mishael, Y., and 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>
- Bernstein, L., and Hayward, H. E. (1958). Physiology of salt tolerance. *Annual Review of Plant Physiology*, 9(1), 25–46. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.09.060158.000325>

- Blumwald, E. (2000). Sodium transport and salt tolerance in plants. *Current Opinion in Cell Biology*, 12(4), 431–434. [https://doi.org/10.1016/S0955-0674\(00\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0955-0674(00)00112-5)
- Boland, D. J., Brooker, M. I. H., Chippendale, G. M., Hall, N., Hyland, B. P. M., Johnston, R. D., Kleinig, D. A., McDonald, M. W., and Turner, J. D. (2006). *Forest Trees of Australia* (5a ed.). CSIRO.
- Brevik, E. C., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., Pereg, L., Quinton, J. N., Six, J., and van Oost, K. (2015). *The interdisciplinary nature of SOIL*. *Soil*, 1(1), 117–129. <https://doi.org/10.5194/soil-1-117-2015>
- Burney, O., Aldrete, A., Álvarez Reyes, R., Prieto Ruiz, J. A., Sánchez Velázquez, J. R., y Mexal, J. G. (2015). México — Addressing Challenges to Reforestation. *Journal of Forestry*, 113(4), 404–413. <https://doi.org/https://doi.org/10.5849/jof.14-007>
- Can-Chulim, Á., Cruz-Crespo, E., Ortega-Escobar, H. M., Sánchez-Bernal, E. I., Madueño-Molina, A., Bojórquez-Serrano, J. I., y Mancilla-Villa, Ó. R. (2017). Respuesta de *Phaseolus vulgaris* a la salinidad generada por NaCl, Na₂SO₄ y NaHCO₃. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(6), 1287–1300. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i6.294>
- Carranza-Edwards, A. (2018). Lithological correlation of Texcoco lake subsoil. *Hidrobiológica*, 28(1), 93–101. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2018v28n1/carranza>
- Chari, M. M., Nemati, F., Afrasiab, P., Kahkhamoghaddam, P., and Davari, A. (2013). Prediction of evaporation from shallow water table using regression and artificial neural networks. *Journal of Agricultural Science*, 5(1), 168–180. <https://doi.org/10.5539/jas.v5n1p168>
- Cony, M. A., and Trione, S. O. (1998). Inter- and intraspecific variability in *Prosopis flexuosa* and *P. chilensis*: seed germination under salt and moisture stress. *Journal of Arid Environments*, 40(3), 307–317. <https://doi.org/10.1006/jare.1998.0448>
- Coras Merino, P. M., Ontiveros Capurata, R., y Diakite Diakite, L. (2014). Movimiento del agua freática y concentración de sales en suelos agrícolas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(4), 537–548.
- Córdoba-Rodríguez, D., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., y Muñoz-Orozco, A. (2011). Crecimiento de la raíz en plantas jóvenes de *Pinus pinceana* Gordon en respuesta a la humedad del suelo. *Agrociencia*, 45(4), 493–506.
- Dagar, J. C., Singh, G., and Singh, N. T. (2001). Evaluation of forest and fruit trees used for rehabilitation of semiarid alkali-sodic soils in India. *Arid Land Research and Management*, 15(2), 115–133. <https://doi.org/10.1080/15324980151062742>

- David, A., Yadav, S., Baluška, F., and Bhatla, S. C. (2015). Nitric oxide accumulation and protein tyrosine nitration as a rapid and long distance signaling response to salt stress in sunflower seedlings. *Nitric Oxide*, 50, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.niox.2015.08.003>
- de la Paix, M. J., Lanhai, L., Xi, C., Varennyam, A., Nyongesah, M. J., and Habiyaremye, G. (2011). Physicochemical properties of saline soils and aeolian dust. *Land Degradation & Development*, 24(6), 539–547. <https://doi.org/10.1002/ldr.1148>
- De Vos, A., Bruning, B., Van Straten, G., Oosterbaan, R., Rozema, J., and Van Bodegom, P. (2016). Crop salt tolerance under controlled field conditions in The Netherlands, based on trials conducted at Salt Farm Texel. *Salt Farm Texel*. Recuperado de <https://edepot.wur.nl/409817>
- Dendooven, L., Alcántara-Hernández, R. J., Valenzuela-Encinas, C., Luna-Guido, M., Perez-Guevara, F., and 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>
- DERM, Department of Environment and Resource Management (2011). Salinity Management Handbook (2a ed.), Tomorrow's Queensland. 172 p.
- Espinosa-Castillo, M. (2008). Procesos y actores en la conformación del suelo urbano en el ex lago de Texcoco. *Economía, Sociedad y Territorio*, VIII(27), 769–798. <https://doi.org/10.22136/est002008204>
- Fan, S., Blake, T. J., and 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>
- Fan, X., Pedroli, B., Liu, G., Liu, Q., Liu, H., and Shu, L. (2012). Soil salinity development in the yellow river delta in relation to groundwater dynamics. *Land Degradation and Development*, 23(2), 175–189. <https://doi.org/10.1002/ldr.1071>
- Feikema, P. M., Morris, J. D., and Connell, L. D. (2010). The water balance and water sources of a Eucalyptus plantation over shallow saline groundwater. *Plant and Soil*, 332(1), 429–449. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0309-2>
- Gebauer, J., El-Siddig, K., Salih, A. A., y 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>
- Gill, H. S., and Abrol, I. P. (1991). Salt affected soils, their afforestation and its ameliorating influence. *International Tree Crops Journal*, 6(4), 239–260. <https://doi.org/10.1080/01435698.1991.9752890>
- Gómez-Romero, M., Soto-Correa, J. C., Blanco-García, J. A., Sáenz-Romero, C., Villegas, J., y Lindig-Cisneros, R. (2012). Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia*, 46(8), 795–807.

- Gorham, J., Jones, R. G. W., and McDonnell, E. (1985). Some mechanisms of salt tolerance in crop plants. *Plant and Soil*, 89(1–3), 15–40. <https://doi.org/10.1007/BF02182231>
- Gupta, B., and Huang, B. (2014). Mechanism of salinity tolerance in plants: physiological, biochemical, and molecular characterization. *International Journal of Genomics*, 2014, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2014/701596>
- Gupta, J., Dubey, R. K., Kaur, N., and Choudhary, O. P. (2020). Evaluation of subtropical ornamental trees for reclaiming salinity affected lands. *Journal of Forestry Research*, 31(3), 807–817. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0851-y>
- Gupta, R. K., Abrol, I. P., Finkl, C. W., Kirkham, M. B., Arbestain, M. C., Macías, F., Chesworth, W., Germida, J. J., Loeppert, R. H., Cook, M. G., Schwab, G. O., Konstankiewicz, K., Pytka, J., Oertli, J. J., Singer, A., Edmonds, W. J., Feng, Y., Feldman, S. B., Shang, C., Zelazny, L. W., Ford, P. W., Clothier, Brent E. and Arshad, M. A. (2008). Soil salinity and salinization. In W. Chesworth (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science* (pp. 699–704). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_552
- Gutiérrez, C. M., y Ortiz, S. C. (1999). Origen y evolución de los suelos del ex lago de Texcoco, México. *Agrociencia*, 33(2), 199–208.
- Gutierrez, C., Stoops, G., and Ortiz, S. C. A. (1998). Calcium carbonate in the soils of Texcoco ex Lake. *Terra*, 16(1), 11–19.
- Hasegawa, P. M. (2013). Sodium (Na⁺) homeostasis and salt tolerance of plants. *Environmental and Experimental Botany*, 92, 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.03.001>
- Hayward, H. E., and Wadleigh, C. H. (1949). Plant growth on saline and alkali soils. *The Botanical Review* (Vol. 11, Número 4, pp. 1–38). [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60745-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60745-2)
- Hernández, J. A., Olmos, E., Corpas, F. J., Sevilla, F., and del Río, L. A. (1995). Salt-induced oxidative stress in chloroplasts of pea plants. *Plant Science*, 105(2), 151–167. [https://doi.org/10.1016/0168-9452\(94\)04047-8](https://doi.org/10.1016/0168-9452(94)04047-8)
- Huez-López, M. A., Ortega-Escobar, H. M., Ramírez-Ayala, C., y Rone-Puello, J. L. (1989). Características de algunas propiedades físico-químicas de los suelos y espesores subyacentes del predio Montecillo. *Agrociencia*, 78, 231–247.
- Ikkonen, E. N., García-Calderón, N. E., Ibáñez-Huerta, A., Etchevers-Barra, J. D., and 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>

- Ivushkin, K., Bartholomeus, H., Bregt, A. K., Pulatov, A., Kempen, B., and de Sousa, L. (2019). Global mapping of soil salinity change. *Remote Sensing of Environment*, 231(March), 111260. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111260>
- Jimenez-Casas, M., and 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>
- Kayama, M., Quoreshi, A. M., Kitaoka, S., Kitahashi, Y., Sakamoto, Y., Maruyama, Y., Kitao, M., and Koike, T. (2003). Effects of deicing salt on the vitality and health of two spruce species, *Picea abies* Karst., and *Picea glehnii* Masters planted along roadsides in northern Japan. *Environmental Pollution*, 124(1), 127–137. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00415-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00415-3)
- Khalidi, A., Ammar, R. Ben, Woo, S. Y., Akrimi, N., y Zid, E. (2011). Salinity tolerance of hydroponically grown *Pinus pinea* L. seedlings. *Acta Physiologiae Plantarum*, 33(3), 765–775. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0601-z>
- Khamzina, A., Sommer, R., Lamers, J. P. A., and Vlek, P. L. G. (2009). Transpiration and early growth of tree plantations established on degraded cropland over shallow saline groundwater table in northwest Uzbekistan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(11), 1865–1874. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.06.015>
- Kocheva, K., and Georgiev, G. (2003). Evaluation of the reaction of two contrasting Barley (*Hordeum Vulgare* L.) cultivars in response to osmotic stress with PEG 6000. *Bulgarian Journal Plant Physiology*, 290–294.
- Kovda, V. A. (1947). Origin and regime of salt-affected soils. Volumes I and II. Izdatelstvo Akademii Nauk.
- Kovda, V. A. (1973). Chemistry of saline and alkali soils of arid zones. En V. A. Kovda, C. Van Den Berg, and R. M. Hagan (Eds.), *Irrigation, Drainage and Salinity* (pp. 142–175). FAO, UNESCO.
- Kovda, V. A., Yaron, B., Shalhevet, Y., Szaboles, I., and Darab, K. (1973). Quality of irrigation water. En V. A. Kovda, C. V. D. Berg, and R. M. Hagan (Eds.), *Irrigation, Drainage and Salinity* (1a ed., pp. 177–205). FAO, UNESCO.
- Kozłowski, T. T. (2000). Responses of woody plants to human-induced environmental stresses: issues, problems, and strategies for alleviating stress. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 19(2), 91–170. <https://doi.org/10.1080/07352680091139196>
- Kumar, N., Kiran, F., and Etxeberria, E. (2018). Huanglongbing-induced anatomical changes in citrus fibrous root orders. *HortScience*, 53(6), 829–837. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12390-17>

- LaLonde, S. M. (2012). Transforming variables for normality and linearity – When, how, why and why not's. SAS Global Forum 2012, 1–8.
- Landis, T. D. (2005). Top pruning. En R. K. Dumroese, T. D. Landis, and R. Watson (Eds.), *Forest Nursery Notes* (Números R6-CP-TP-06–2005, pp. 13–16). USDA Forest Service, Pacific Northwest Region, State and Private Forestry, Cooperative Programs.
- Läuchli, A., and Grattan, S. R. (2012). Plant responses to saline and sodic conditions. En W. W. Wallender and K. K. Tanji (Eds.), *Agricultural salinity assessment and management* (2a ed., pp. 169–205). American Society of Civil Engineers, Environmental Water Resources Institute.
- Levitt, J. (1980). Salt and Ion Stresses. En *Responses of plants to environmental stresses. Volume II. Water, radiation, salt, and other stresses.* (2a ed., p. 607). Academic Press.
- Li-ping, L., Xiao-hua, L., Hong-bo, S., Zhao-Pu, L., Ya, T., Quan-suo, Z., and 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>
- Li, M., and Leung, D. W. M. (2000). Starch accumulation is associated with adventitious root formation in hypocotyl cuttings of *Pinus radiata*. *Journal of Plant Growth Regulation*, 19(4), 423–428. <https://doi.org/10.1007/s003440000020>
- Li, Y., Chen, C., Wen, K., Li, G., Cao, P., Zhang, Y., and Tackett, T. M. (2015). Abandoned reverse osmosis membrane effects on phytoremediation of saline soils with trees. *Ecological Engineering*, 84, 660–667. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.039>
- Lopez-Acosta, N. P., Espinosa-Santiago, A. L., and Barba-Galdámez, D. F. (2019). Characterization of soil permeability in the former Lake Texcoco, Mexico. *GeoScape*, 11(1), 113–124. <https://doi.org/10.1515/geo-2019-0010>
- López-Ávila, G., Gutiérrez-Castorena, M. del C., Ortiz-Solorio, C. A., Flores-Román, D., y Segura-Castruita, M. Á. (2004). Sedimentos del ex-lago de Texcoco y su comportamiento con la aplicación de materiales calcáreos y compactación. *TERRA Latinoamericana*, 22(1), 1–10.
- López-López, M. Á., y 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.
- López-Mora, L. I., Gutiérrez-Martínez, P., Bautista-Baños, S., Jiménez-García, L. F., y Zavaleta-Mancera, H. A. (2013). Evaluación de la actividad antifúngica del quitosano en *Alternaria alternata* y en la calidad del mango “tommy atkins” durante el almacenamiento. *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, 19(3), 315–331. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.07.038>

- López-Ríos, G. F. (2012). Organografía: raíz. En Botánica. anatomía, morfofisiología y diversidad (2a ed., pp. 87–107). Universidad Autónoma Chapingo.
- López-Upton, J., y Muñoz, A. (1991). Selección familiar por tolerancia a sequía en *Pinus greggii* Engelm. I. Evaluación en plántula. *Agrociencia*, 2(2), 111–123.
- Luangjame, J. (1990). Salinity effects in *Eucalyptus camaldulensis* and *Combretum quadrangulare*. Ecophysiological and morphological studies. En Acta Forestalia Fennica (Número 214). The Society of Forestry in Finland.
- Lugojan, C., and Ciulca, S. (2011). Evaluation of relative water content in winter wheat. *Forestry and Biotechnology*, 15(2), 173–177.
- Luna-Flores, W., Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J. J. M., y 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(54), 343–353.
- Marcar, N., Ismail, S., Hossain, A., and Ahmad, R. (1999). Trees, shrubs and grasses for saltlands: an annotated bibliography. En Australian Centre for International Agricultural Research (Número 56). Australian Centre for International Agricultural Research.
- Mass, E. V. (1987). Salt tolerance of plants. En B. R. Christie (Ed.), CRC Handbook of plant science in agriculture (p. 20). CRC Press.
- Meloni, D. A., Gulotta, M. R., and Martínez, C. A. (2008). Salinity tolerance in *Schinopsis quebracho colorado*: Seed germination, growth, ion relations and metabolic responses. *Journal of Arid Environments*, 72(10), 1785–1792. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.05.003>
- Meloni, D. A., Gulotta, M. R., Martínez, C. A., and Oliva, M. A. (2004). The effects of salt stress on growth, nitrate reduction and proline and glycinebetaine accumulation in *Prosopis alba*. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 16(1), 39–46. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202004000100006>
- Mohedano-Caballero, L., Cetina-Alcalá, V. M., Chacalo-Hilu, A., Trinidad-Santos, A., y González-Cossio, F. (2005). Crecimiento y estrés post-trasplante de árboles de pino en suelo salino urbano. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 11(1), 43–50.
- Moreno, S. E. (2007). Características territoriales, ambientales y sociopolíticas del Municipio de Texcoco, Estado de México. *Quivera*, 9(1), 177–206.
- Munns, R. (1993). Physiological processes limiting plant growth in saline soils: some dogmas and hypotheses. *Plant, Cell and Environment*, 16(1), 15–24. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1993.tb00840.x>
- Munns, R., and Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>

- Nedjimi, B. (2017). How NaCl, Na₂SO₄, MgCl₂ and CaCl₂ Salts Affect the Germinability of *Pinus halepensis* Mill. *Current Science*, 113(10), 2031–2035. <https://doi.org/10.18520/cs/v113/i10/2031-2035>
- Nouri, H., Chavoshi Borujeni, S., Nirola, R., Hassanli, A., Beecham, S., Alaghmand, S., Saint, C., and Mulcahy, D. (2017). Application of green remediation on soil salinity treatment: A review on halophytoremediation. *Process Safety and Environmental Protection*, 107, 94–107. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.01.021>
- Oba, G., Nordal, I., Stenseth, N. C., Stave, J., Bjorå, C. S., Muthondeki, J. K., and 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>
- Olukoye, G. A., Wamicha, W. N., and Kinyamario, J. I. (2003). Assessment of the performance of exotic and indigenous tree and shrub species for rehabilitating saline soils of Northern Kenya. *African Journal of Ecology*, 41(2), 164–170. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2028.2003.00430.x>
- Pérez-Miranda, R., Valdez-Lazalde, J. R., Moreno-Sánchez, F., González-Hernández, A., y Valdez-Hernández, J. I. (2011). Predicción Espacial de cambios del uso del suelo en Texcoco, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(5), 59–72.
- Pimienta-Barrios, E., Robles-Murguía, C., y Martínez-Chávez, C. C. (2012). Respuesta ecofisiológica de árboles jóvenes nativos y exóticos a sequía y lluvia. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(5), 15–20.
- Pla Sentís, I. (2021). Overview of salt-affected areas in Latin America: Physical, social and economic perspectives. En E. Taleisnik and R. S. Lavado (Eds.), *Saline and alkaline soils in Latin America: natural resources, management and productive alternatives* (pp. 3–36). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-52592-7_1
- Prisco, J. T., Gomes-Filho, E., and Miranda, R. S. (2016). Physiology and biochemistry of plants growing under salt stress. En H. R. Gheyi, N. da S. Dias, C. F. de Lacerda, and E. Gomes-Filho (Eds.), *Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados* (pp. 163–180). INCTsal.
- Qadir, M., Tubeileh, A., Akhtar, J., Larbi, A., Minhas, P. S., and 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>
- Rai, M. K., Jaiswal, V. S., and 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>

- Ramírez-Carmona, M., Méndez-Montiel, J. T., Pérez-Vera, O. A., y Campos-Bolaños, R. (2016). Primer registro de *Opsius stactogalus* (Fieber, 1866) (Hemiptera: Cicadellidae) en *Tamarix chinensis* (Lour, 1790) (Tamaricaceae) para México. *Acta Zoológica Mexicana* (N.S.), 32(2), 215–217. <https://doi.org/10.21829/azm.2016.322955>
- Ramírez-Herrera, C., Vargas-Hernández, J. J., y López-Upton, J. (2005). Distribución y conservación de las poblaciones naturales de *Pinus greggii*. *Acta Botanica Mexicana*, 72, 1–16.
- Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57(5), 1017–1023. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj108>
- Reyes-Esteves, G. I., López-Upton, J., Velasco-García, M. V., and Jiménez-Casas, M. (2022). Genetic parameters of a progeny trial of *Pinus greggii* Engelmann 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. En Soil Science Society of America Journal (Vol. 18, Número 3). *United States Department of Agriculture*. <https://doi.org/10.2136/sssaj1954.03615995001800030032x>
- Rojas-Oropeza, M., Dendooven, L., Garza-Avenidaño, L., Souza, V., Philippot, L., and 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., and Dendooven, L. (2009). Denitrification in extreme alkaline saline soils of the former lake Texcoco. *Plant and Soil*, 319(1–2), 247–257. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9867-y>
- Rzedowski, J. (1957). Algunas asociaciones vegetales de los terrenos del lago de Texcoco. *Botanical Sciences*, 21, 19–33. <https://doi.org/10.17129/botsci.1036>
- Rzepka-Plevneš, D., Kulpa, D., and 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1234/4.2006.900>
- Sá, F. V. da S., Brito, M. E. B., Pereira, I. B., Antônio Neto, P., Silva, L. D. A., y Costa, F. B. da. (2015). Balanço de sais e crescimento inicial de mudas de pinheira (*Annona squamosa* L.) sob substratos irrigados com água salina. *IRRIGA*, 20(3), 544–556. <https://doi.org/10.15809/irriga.2015v20n3p544>

- Sánchez-Bernal, E. I., Ortega-Escobar, H. M., Muñoz-Hernández, E. N., Can-Chulim, Á., Ortega-Baranda, V., and 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>
- Sánchez-Díaz, M., y Aguirreolea, J. (2013). Absorción de agua por la raíz y transporte por el xilema. Balance hídrico de la planta. En J. Azcón-Bieto y M. Talón (Eds.), *Fundamentos de Fisiología vegetal* (2a ed., p. 651). McGRAW-HILL.
- Sastre-Conde, I., Carmen Lobo, M., Icela Beltrán-Hernández, R., and Poggi-Varaldo, H. M. (2015). Remediation of saline soils by a two-step process: Washing and amendment with sludge. *Geoderma*, 247–248, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.12.002>
- Segura-Castruita, M. A., Gutiérrez, M. del C., Ortiz, C. A., and Gómez, D. (2000). Clay soils of the eastern zone of the State of Mexico. *Terra*, 18(1), 35–44.
- Šerá, B. (2017). Salt-tolerant trees usable for Central European cities – Review. *Horticultural Science*, 44(No. 1), 43–48. <https://doi.org/10.17221/201/2015-HORTSCI>
- Shahid, S. A., Zaman, M., and Heng, L. (2018). Soil salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem. En *Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques* (pp. 43–53). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_2
- Shanon, M. C. (1997). Adaptation of plants to salinity. *Advances in Agronomy*, 60, 75–120. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60601-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60601-X)
- SHCP, Secretaría de Hacienda y Credito Publico (1969). Proyecto Texcoco: Manual de trabajos realizados y conclusiones.
- Sigala-Rodríguez, J. Á., González-Tagle, M. A., y 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, A. R., Bezerra, F. T. C., Cavalcante, L. F., Pereira, W. E., Araújo, L. M., and Bezerra, M. A. F. (2018). Frequency of irrigation with saline water in sugar-apple seedlings produced on substrate with polymer. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 22(12), 825–830. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n12p825-830>
- Silva, C. C., Guido, M. L., Ceballos, J. M., Marsch, R., and 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>

- Singh, K., Pandey, V. C., Singh, B., and Singh, R. R. (2012). Ecological restoration of degraded sodic lands through afforestation and cropping. *Ecological Engineering*, 43, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.02.029>
- Soto-Coloballes, N. V. (2019). Proyectos y obras para el uso de los terrenos desecados del antiguo Lago de Texcoco, 1912-1998. *Estudios de Historia Moderna Contemporanea de Mexico*, 58, 259–287. <https://doi.org/10.22201/IIH.24485004E.2019.58.70695>
- Strogonov, B. P. (1962). Effect of various types of salinity on growth and development of plants. En B. P. Strogonov (Ed.), *Physiological basis of salt tolerance of plants (as affected by various types of salinity)* (pp. 45–68). Akademiya Nauk. Institute of Plant Physiology.
- Suarez, D. L., Wood, J. D., and 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>
- Sun, D., and Dickinson, G. (1993). Responses to salt stress of 16 Eucalyptus species, *Grevillea robusta*, *Lophostemon confertus* and *Pinus caribea* var. *hondurensis*. *Forest Ecology and Management*, 60(1–2), 1–14. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(93\)90019-J](https://doi.org/10.1016/0378-1127(93)90019-J)
- Tan, X., Wu, J., Huang, J., Wu, M., and 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>
- Tarín, M., y Velázquez, A. (1986). Lavado de suelos en el ex-Lago de Texcoco. *Ingeniería hidráulica en México*, mayo-agosto, 30–49.
- Tomar, O. S., and Gupta, R. K. (1985). Performance of some forest tree species in saline soils under shallow and saline water-table conditions. *Plant and Soil*, 87(3), 329–335. <https://doi.org/10.1007/BF02181900>
- Tomar, O. S., Gupta, R. K., and Dagar, J. C. (1998). Afforestation techniques and evaluation of different tree species for waterlogged saline soils in semiarid tropics. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 12(4), 301–316. <https://doi.org/10.1080/15324989809381520>
- Trejo-Téllez, L. I., Gómez-Merino, F. C., y Alcántar-González, G. (2016). Elementos benéficos: potencialidades y limitantes. En G. Alcántar-González, L. I. Trejo-Téllez, y F. C. Gómez-Merino (Eds.), *Nutrición de Cultivos* (2a ed., pp. 59–101). Biblioteca Básica de Agricultura.
- Valderrama, R., Corpas, F. J., Carreras, A., Fernández-Ocaña, A., Chaki, M., Luque, F., Gómez-Rodríguez, M. V., Colmenero-Varea, P., del Río, L. A., and Barroso, J. B. (2007). Nitrosative stress in plants. *FEBS Letters*, 581(3), 453–461. <https://doi.org/10.1016/j.febslet.2007.01.006>

- Vega-Jarquín, C., García-Mendoza, M., Jablonowski, N., Luna-Guido, M., and Dendooven, L. (2003). Rapid immobilization of applied nitrogen in saline-alkaline soils. *Plant and Soil*, 256(2), 379–388. <https://doi.org/10.1023/A:1026182211065>
- Vitz, M. (2012). “The lands with which we shall struggle”: Land reclamation, revolution, and development in Mexico’s lake Texcoco basin, 1910 – 1950. *Hispanic American Historical Review*, 92(1), 41–71. <https://doi.org/10.1215/00182168-1470968>
- Wang, A.-F., Zhang, G., Qie, Y.-X., Xiang, D.-Y., Di, B., and Chen, Z.-P. (2012). Effects of drought on physiological characteristics of needles of *Pinus bungeana* Zucc seedlings. *Zhiwu Shengli Xuebao/Plant Physiology Journal*, 48, 189–196.
- Wang, Y., Peng, X., Salvato, F., Wang, Y., Yan, X., Zhou, Z., and Lin, J. (2019). Salt-adaptive strategies in oil seed crop *Ricinus communis* early seedlings (cotyledon vs. true leaf) revealed from proteomics analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 171(26), 12–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.046>
- Woodward, A. J., and 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(2), 189–200. <https://doi.org/10.1007/s11240-005-0515-4>
- Yin, D., Halifu, S., Song, R., Qi, J., Deng, X., and Deng, J. (2020). Effects of an ectomycorrhizal fungus on the growth and physiology of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings subjected to saline–alkali stress. *Journal of Forestry Research*, 31(3), 781–788. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-01007-7>
- Yu, J., Wang, Z., Meixner, F. X., Yang, F., Wu, H., and 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., and 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>
- Zhang, J. (2014). Tree species selection for soil salinity resistance. In Coastal saline soil rehabilitation and utilization based on forestry approaches in China (pp. 125–134). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39915-2_14
- Zhang, Z., and Yu, F. (2019). Effects of salt stress on seed germination of four ornamental non-halophyte species. *International Journal of Agriculture and Biology*, 21(1), 47–53. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0860>

ANEXOS

Anexo 1. Perforación de cepas profundas (1 m de profundidad y 0.60 m de diámetro) y cepas testigo (0.40 x 0.30 m)



Cepas profundas



Cepas Testigo

Anexo 2. Preparación del sustrato.



Anexo 3.a Primer prueba de establecimiento de árboles en suelos salino sódicos, con cuatro especies de pino y guayabo.



Plantación establecida



P. pseudostrobus



P. greggii var.
australis



P. leiophylla



P. ayacahuite



P. guajava

Anexo 3.b Especies supervivientes después de 280 días.



Psidium guajava

Anexo 4. Segunda prueba de establecimiento de árboles en suelos salino sódicos.

I. *Nicotiana glauca* Graham



Establecimiento, 16 mayo 2020



Supervivencia, dos años después, 18 junio 2022

II. *Schinus molle* L.



a) Establecimiento, 17 julio 2020



a) Supervivencia dos años después, 21 junio 2022

III. *Pinus cembroides* subsp. *orizabensis* en tubo de pvc



a) Establecimiento, 13 abril 2021



b) Supervivencia dos años después, 22 junio 2022

Anexo 5. Registro de invasión natural en las cepas con sustrato por *Kochia scoparia* (L.) Schrad.



Anexo 6. Proceso de establecimiento y exploración de las raíces a través de un rizotrón.



Establecimiento del vidrio y plantación del árbol para el rizotrón



Zanja para explorar los rizotrones



Medición de Contenido volumétrico de humedad



Cuadrantes de exploración de raíces

Anexo 7. Condición de brinzales de *Pinus greggii* var. *australis* cuando se aplicaron de diferentes salinidades con diferentes concentraciones (dS m^{-1}).



Anexo 8. Registro de colecta de material vegetal para el análisis de biomasa radical y aérea de los árboles de *Pinus greggii* var. *australis* en vivero.

I. Testigo



II. Salinidad clorhídrica



III. Salinidad sulfática



IV. Salinidad sulfática sódica

