

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA



CARRERA DE BIÓLOGO

ÁREA DE EDAFOLOGÍA

Mesembryanthemum crystallinum L. como restaurador de los suelos salinos del ex –
Lago de Texcoco.

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGO

PRESENTA:

GUERRERO ORTIZ RICARDO H.

Director de Tesis:

Dr. VICENTE ESPINOSA HERNÁNDEZ.

Asesor Interno:

Dr. GERARDO CRUZ FLORES.



MÉXICO, D.F.

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



AGRADECIMIENTO

M. en C. Ma. De Jesús Sánchez Colín.

Dr. Vicente Espínosa Hernández.

Dr. Gerardo Cruz Flores.

M. en C. Rosalva García Sánchez.

M. en C. Miguel Castillo González.

A todos ellos les doy las gracias por haberme dedicado parte de su tiempo, apoyo y conocimiento para enriquecer este trabajo.



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por abrirme las puertas de la enseñanza, para superarme como persona y desenvolverme en el ámbito profesional.

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por haberme proporcionado confianza, protección, cultura y principalmente educación.

Al Dr. Vicente Espinosa Hernández, por brindarme toda su confianza, tiempo, dedicación y paciencia para realizar este trabajo, principalmente agradezco todo el apoyo que me ha dado, sobretodo por compartir todos sus conocimientos, que no solo me han ayudado a nivel cultural, si no también me han servido de guía para poder superarme y mejorar como persona. Y lo mas importante quiero agradecerle por esa valiosa amistad que espero dure toda la vida.

A la Sra. Yolanda de Espinosa, por brindarme su amistad y sobretodo por presionar al Dr. Vicente para lograr un buen trabajo.

Al Dr. Gerardo Cruz Flores, por el tiempo, dedicación, conocimiento y apoyo en este trabajo.

Al Dr. Omar Pantoja por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto.

A Laura Balan Hernández por su valiosa ayuda y colaboración en este trabajo, sobretodo por brindarme su amor, amistad y confianza, por compartir increíbles momentos, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por todo eso y más de todo corazón gracias mi amor.

A los alumnos del laboratorio de edafología y amigos: Enrique Suaotegui Méndez y Cuatrecasas por su ayuda, colaboración y amistad.

Al laboratorio de edafología, por brindarme algunas facilidades para realizar este trabajo.

A la Universidad Autónoma Chapingo, principalmente al laboratorio de física y química de suelos a cargo del M.C. Edmundo Robledo y sus

laboratoristas, por permitirme realizar parte de este trabajo, sobre todo por sus enseñanzas, su tiempo, apoyo y atenciones brindadas.

De la misma manera agradezco al Colegio de Postgraduados y trabajadores, ya que por medio de sus facilidades y aportes se realizaron los objetivos planteados.

A mis amigos de la Universidad Juan, Sandra, Enrique S, Eric, Efraín, Elid, Enrique G, por compartir momentos inolvidables y ofrecerme su amistad y ayuda a lo largo de la carrera.

A mis amigos de la lucha libre por toda la ayuda, comprensión, confianza y paciencia que me dieron para poder culminar mi carrera.



DEDICATORIA

A mis padres Ricardo Guerrero Mariles y Cristina Ortiz Delgado, que con su amor, entrega, educación y cariño he llegado hasta esta parte fundamental de mi vida. Gracias a los dos por guiarme por el buen camino por convertirme en una persona de bien en este camino que sin duda está lleno de tropiezos, y que cuando miro a mi alrededor y veo un mundo lleno de vicios, tristeza, amargura e ignorancia, me doy cuenta de lo afortunado que soy al tenerlos a ustedes como padres. Ahora que me encuentro a la mitad del camino con la culminación de mi carrera me siento dichoso y feliz al voltear hacia atrás, mirar el pasado y recordar todos aquellos momentos que por alguna razón me disgustaba con ustedes, pero ahora es cuando les doy la razón y valoro tanto sus regaños y pláticas, por que gracias a eso soy lo que soy.

No tengo nada que alcance con que pagarles todo lo que me han dado y en lo que me han convertido, solo me queda estar eternamente agradecido y darles este trabajo que es fruto de su trabajo y esfuerzo depositados en mí y que sin duda, tenganlo por seguro seguiré tomando en cuenta todos sus consejos y poniendo todo mi empeño y dedicación en cada paso que de.

Creo que el mejor trabajo de sus vidas fue ser padres y lo han hecho excelente, los amo muchísimo.

A las dos personitas más importantes en mi vida mis hermanas Pilar y Gabriela, que son una razón para esforzarme cada día y en cada cosa que hago, también por que siempre me han apoyado y se han preocupado por mí, este trabajo también es de ustedes, las quiero.

A mis abuelas Aurelia, Lourdes y Pilar que son parte fundamental de mi vida y que sin sus sabios consejos no hubiera podido llegar hasta aquí.

A toda mi familia que me ha apoyado y que es la base de todas mis alegrías.

A ti Laura que eres el amor de mi vida y que te has convertido en parte fundamental, te agradezco por toda tu ayuda, paciencia y momentos



inolvidables y de alegría que a tu lado he pasado, por que contigo he aprendido más de mil cosas, y estoy súper agradecida que hallas llegado a mi vida, eres una increíble persona y la mejor de todas las mujeres, gracias mi amor por todo lo que me has dado y enseñado.

SE AMO.



INDICE

Contenido	Página
Resumen	1
I. Introducción	2
1.1 Antecedentes	4
1.2 Planteamiento del Problema	8
1.3 Justificación	9
1.4 Hipótesis	10
1.5 Objetivos	11
II. Revisión de Literatura	12
2.1 Generalidades sobre la salinidad	12
2.2 Origen de las sales	12
2.3 Factores que favorecen la salinización	14
2.4 Clasificación y descripción de los suelos según su contenido de sales	16
2.5 Efecto de las sales en el suelo	18
2.6 Efecto específico de los cuatro cationes asociados a la salinidad en la planta	21
2.7 Recuperación de suelos salinos – sodicos	23
2.8 1.a fitorremediación	30
2.9 <i>Mexembryanthemum crystallinum</i> L.	33
2.10 Adaptación a las condiciones salinas	35
III. Localización y Descripción del Área de estudio	38
3.1 Caracterización del ex – Lago de Texcoco	40
IV. Materiales y Método	45
V. Análisis y Discusión de resultados	49



5.1 Discusión general	65
VI. Conclusiones	71
VII. Recomendaciones.	72
VIII. Bibliografía	74



RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el fin de ofrecer una nueva alternativa de restaurar suelos salinos a través de la especie *Mesembryanthemum crystallinum* L. , además de contribuir con la recuperación de los suelos del ex-Lago de Texcoco, que presenta un problema particular de salinidad, pues reúne una serie de limitantes para el desarrollo no solo de cultivos, sino incluso para la mayor parte de la vegetación silvestre adaptada a condiciones extremas de salinidad *Mesembryanthemum crystallinum* L.

Se hicieron análisis antes de trasplantar y después de cosechar *Mesembryanthemum crystallinum* L. de pH, C.E, Ca, Mg, Na y K, para posteriormente hacer una comparación y analizar los cambios ocurridos que la planta pudiese haber ocasionada en el suelo. Se observó que la planta tuvo un 55% de éxito de sobrevivencia, lo cuál indica que superó las expectativas de adaptación que se tenían.

Es así que esta alternativa no sólo es una forma ecológica de restaurar el suelo, evitando así la aplicación de químicos o la formación de canales y drenes que de alguna manera causan algún impacto en el terreno; si no también es una fuente de ingreso, ya que esta especie puede ser utilizada como planta de ornato, así como planta para consumo animal.



I. INTRODUCCIÓN

Debido al agudo problema de alimentación que se presenta a nivel mundial y nacional, resulta urgente aprovechar de una forma más eficiente la superficie cultivable, con el fin de alcanzar una mayor productividad, ya que la problemática de agotamiento y deterioro del recurso suelo y las actividades productivas que en el se realizan, requieren y es indispensable llevar a cabo estudios y obras que permitan, de la manera más apropiada, rehabilitar áreas que presenten diversos problemas y que están afectando de manera directa e indirecta la producción agrícola.

Dentro de este agudo problema se encuentra la zona del ex – Lago de Texcoco, la cual se caracteriza por presentar fuertes problemas de salinidad extrema, son suelos con textura pesada, niveles freáticos someros, baja velocidad de infiltración, alta alcalinidad y conductividad eléctrica; como consecuencia de un deficiente drenaje que ha contribuido con el problema de recuperación de estos suelos.

Las áreas de suelo afectadas por problemas de sales y sodio están ampliamente distribuidas en el mundo, pero cobran mayor importancia para el hombre, en aquellas superficies de las zonas áridas y semiáridas que se han abierto a la agricultura intensiva, la salinización es un proceso de enriquecimiento del suelo con sales más solubles que el sulfato de calcio, por lo general se trata de sulfatos de sodio y de magnesio, esto provoca evidentes repercusiones sobre la vegetación (Porta; *et al*, 1999).

En México, el problema de la salinidad se presenta fundamentalmente en las zonas áridas con riego y a lo largo de la costa. Los lugares donde se observa con más frecuencia son las cuencas cerradas que, a través de miles de años, han acumulado paulatinamente sales en el perfil del suelo (Fernández, 1990).



No existe una evaluación precisa de las superficies de los suelos con problemas de salinidad y sodicidad en México, sobre todo en las áreas no agrícolas. Sin embargo, puede señalarse, de manera aproximada, la presencia de 3.5 millones de hectáreas afectadas en las zonas áridas y semiáridas, 1 millón en otras zonas no agrícolas, 800 000 en las áreas costeras, 1 millón en áreas agrícolas de temporal y 500 000 en zonas agrícolas de riego, lo cual totaliza unos 6.8 millones de hectáreas de suelos afectados por sales en todo el país. Dentro de estas áreas se encuentran los suelos del ex-Lago de Texcoco (Estado de México), con un alto grado de salinidad (Fernández, 1990), donde a lo largo de millones de años, se han acumulado paulatinamente sales en el perfil de este suelo.

La principal causa que ha influido en la salinización del área que comprende el ex-Lago de Texcoco es el hecho de haber sido una cuenca endorreica, en donde no existían salidas para las aguas almacenadas. Por otra parte, el manto freático presenta altos contenidos de sales y se localiza a poca profundidad, lo cual aunado a que la evaporación es mucho mayor que la precipitación, fomenta el ascenso de sales por capilaridad y las concentra en la superficie. Por todos estos problemas se ha dificultado la incorporación de esta zona a la producción agropecuaria así como a otras actividades productivas. Por lo antes expuesto se ve la importancia que encierra la realización de trabajos encaminados a la recuperación de áreas agrícolas con problemas de ensalitramiento. Es por ello que el presente estudio pretende hacer el uso de la especie *Mesembryanthemum crystallinum* L., planta nativa de África e introducida en diferentes partes del mundo, como Australia, algunos países del Mediterráneo, California E.U.A. y Baja California, México, que puede tolerar suelos salinos. Tiene la ventaja de soportar la sequía, reduce al mínimo la pérdida de agua y asegura su éxito reproductivo en ausencia de lluvia. Por sus propiedades de acumular grandes cantidades de sodio en las hojas y tallos, se propone que esta planta puede tener el fin de restaurar suelos con este tipo de problema, que posterior al tratamiento puedan volver a ser productivos o en su defecto que *Mesembryanthemum crystallinum* L. sea aprovechada para fines económicos (planta de ornato y de alimento para animales) (Canberra, 2004; Bohnert y Cushman, 2000).



1.1 ANTECEDENTES

El área federal del ex-Lago de Texcoco presenta un problema particular de salinidad, pues reúne una serie de limitaciones para el desarrollo no solo de cultivos sino incluso para la mayor parte de la vegetación silvestre adaptada a condiciones de extrema salinidad. Las actividades efectuadas por el Proyecto Lago de Texcoco por la pastización, el riego y las labores recientes de drenaje agrícola, han modificado las características físicas y químicas de la mayor parte de los suelos de manera satisfactoria para el desarrollo de la vegetación. Con base en los resultados de los trabajos de investigación sobre drenaje agrícola y lavado de suelos, se determinó que es técnicamente factible recuperar gran parte de estos suelos para fines agrícolas (Tarín y Velásquez, 1986).

Tarín y Velásquez (1986), señalan que la actual área federal del ex-lago de Texcoco quedó al descubierto al descargarse artificialmente el lago y permanecer sin vegetación durante varias décadas, debido a factores como contenidos excesivos de sales solubles (Conductividad Eléctrica (C.E) de 75 a 200 mmhos/cm); alto contenido de Sodio intercambiable (Por ciento de Sodio intercambiable (PSI) de 30 a 95); elevada alcalinidad (pH de 9.5 a 11); presencia en el perfil del suelo de un material muy hidratado conocido localmente como jaboncillo; nivel freático salino a poca profundidad (con aproximadamente 64,000 ppm de sales); condiciones difíciles de drenaje superficial y ausencia de estructura en el suelo, y como consecuencia drenaje subsuperficial deficiente.

La salinidad y el estrés osmótico se cuentan entre los principales factores abióticos que afectan el crecimiento de las plantas. Altas concentraciones de sal en el suelo (>100 mM de NaCl) perturban la homeostasis iónica y osmótica de las plantas, induciendo la acumulación de niveles tóxicos de iones (como el Na⁺) en el citoplasma y cambios en su potencial osmótico, dificultando la absorción del agua del suelo por las raíces (Zhu, 2001).



Sin embargo, las halófitas han desarrollado diversas estrategias que les permiten crecer y desarrollarse en suelos altamente salinos. Dichas estrategias comprenden la exclusión de Na^+ hacia el suelo o el secuestro de Na^+ en vacuolas o células especializadas de almacenamiento. Además, para balancear los cambios en el potencial osmótico, las células vegetales regulan la síntesis de osmolitos y la actividad y/o expresión de los diferentes mecanismos de transporte de solutos y agua presentes en sus membranas, entre los cuales se encuentra un grupo de proteínas intrínsecas de membrana (MIP, Membrane Intrinsic Proteins) llamadas acuaporinas (AQPs) (Hasegawa *et al*, 2000).

Con respecto a *Mesembryanthemum crystallinum* L. existen algunos trabajos referentes a la salinidad como el de Amescua, Pantoja y Vera (2005) en el que se estudió la función de la acuaporina *McPIP2;1* específica de la raíz de *Mesembryanthemum crystallinum* L. y su localización subcelular en respuesta a la salinidad. Mediante la expresión heteróloga de *McPIP2;1* en ovocitos de *Xenopus laevis* donde se demostró que esta proteína funciona como canal de agua. Para determinar la distribución subcelular de ésta acuaporina se separaron las distintas fracciones microsomales mediante gradientes continuos de sacarosa, localizando a *McPIP2;1* en fracciones intermedias del gradiente (fracciones 12 a la 22), lo cual sugiere que esta proteína se localiza en organelos subcelulares. Las plantas fueron tratadas con 200 mM de NaCl, se observó un aumento en los niveles de proteína, además de un cambio en su localización membranal. La expresión transitoria de *McPIP2;1* acoplada a la proteína verde fluorescente en protoplastos de células de la raíz de *M. crystallinum*, reveló que esta acuaporina se expresa en compartimentos intracelulares, además se observa una mayor expresión de ésta acuaporina en respuesta al tratamiento con NaCl. Los resultados sugieren que estas respuestas pueden ser parte del proceso presente en las células para restaurar la homeostasis iónica y osmótica en compartimentos subcelulares en la raíz cuando las plantas se ven sometidas al estrés salino.



La planta ha atraído a los investigadores a causa de un cambio de C3 a la fotosíntesis CAM (Metabolismo ácido de las crasuláceas) que se produce en plantas jóvenes en su hábitat natural (desierto de Namibia y Sudáfrica) la extensa sequía y el aumento de la salinidad, como principales factores a los que muestra resistencia. Algunos indicios sugieren que el cambio en el metabolismo es fundamental durante el desarrollo de la planta. *Mesembryanthemum crystallinum* L. ha proporcionado algunas pistas sobre los mecanismos empleados en el estrés salino de plantas tolerantes a sobrevivir a condiciones extremas, es una de las pocas especies de plantas que tienen un modelo de carácter en relación con la tolerancia al estrés salino. Por esta razón, se piensa que *Mesembryanthemum crystallinum* L. debe ser una de las especies de plantas cuyo genoma debe ser secuenciados (Bohnert y Cushman, 2000).

Estudios realizados en el área.

Freatimétricos.

Vásquez y Salas (1990), realizaron un estudio freaticométrico con una red de 43 pozos de observación en el área del Vaso del ex – Lago de Texcoco, cuyo objetivo fue analizar el comportamiento del nivel freático, tanto en tiempo como en espacio, para un periodo comprendido de 11 años, mediante la interpretación de planos de isohypsas e isóbatas y de la gráfica área – tiempo; determinando que las líneas de corriente del manto freático indican un flujo de Oriente a Poniente y de Norte a Sur, actuando el Dren General como elemento afluente con un flujo de Poniente a Oriente.

De igual forma encontraron, para los meses mas lluviosos (Junio, Julio, Agosto y Septiembre), que la precipitación es la principal fuente superficial de recarga en el área; por lo que el problema de drenaje se acentúa en esta época, disminuyendo la presencia de mantos freáticos someros en la época de sequía por falta de recarga superficial en toda el



área de estudio, concentrándose en un área específica conocida como Lago de desviación combinada y en la parte Sur del área de estudio.

Contenido de humedad en el suelo.

Tarín y Velásquez (1986), reportan un estudio del contenido de humedad en el suelo, para el cual se tomaron datos de una cuadrícula de muestreo, cuyos contenidos de humedad fluctúan desde 40 % en los estratos superficiales, hasta 80% en los profundos; en general se encontraron contenidos muy elevados de agua retenidos en el complejo de intercambio, que saturan completamente el sustrato.

Drenaje.

Tarín y Velásquez (1986), evaluaron tres diferentes espaciamientos entre drenes (15, 30, y 45 m) con tres diferentes láminas de lavado (1 m, 1.5 m y 2 m). Se estableció previamente el sistema de drenaje, utilizando tubos de albañal de concreto sin juntar y con un filtro de tezontle de 15 cm de espesor alrededor de las juntas de los tubos. La tubería quedó a una profundidad aproximada de 1.80 m y se obtuvo de este trabajo un espaciamiento óptimo entre drenes de 30 m y una lámina de lavado de 2 m.

Recuperación de suelos.

En 1982 se crea el proyecto de recuperación de suelos salinos – sódicos bajo la dirección del Departamento de Salinidad y Drenaje (Vásquez y Salas, 1990). En 1985 se establecen formas más concretas para la recuperación de dichos suelos mediante la aplicación de mejoradores químicos como Azufre, Yeso, la mezcla de ambos y Ácido Sulfúrico concentrado, lo que permitió el establecimiento de algunas especies tolerantes como *Tamarix* y *Nicotiana*. De 1988 a la fecha se han venido realizando prácticas de recuperación de suelos, con la aplicación de mejoradores químicos, logrando establecer



especies cultivables como el maíz, cebada, avena, trigo, remolacha y cochia, en la zona Oriente, que cuenta con una extensión de 150 ha aproximadamente, donde el suelo ya presenta textura y estructura propia. El Proyecto Lago de Texcoco ha realizado algunas prácticas, tratando de incorporar sus suelos aún cuando estos presentan condiciones adversas para el desarrollo de cultivos. Los trabajos que se han realizado en ciertas áreas de la zona, han sido principalmente la propagación vegetativa del pasto salado, así como la introducción de diferentes especies de pastos, riego para lavado de suelos, labores de drenaje agrícola y cultivos tolerantes a la salinidad, ejerciendo con esto el control de tolvaneras y favoreciendo a la vez el desarrollo de la agricultura y la ganadería (Vásquez y Salas, 1990).

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como parte de los efectos inmediatos a la desecación del Lago de Texcoco quedó al descubierto un amplio lecho salitroso que genera algunos efectos negativos en la vida animal y vegetal, ya que es un gran espacio desaprovechado y que bien podría ser ocupado para la agricultura u otros fines en común, es un foco insalubre para los habitantes de la región en tiempos de estiaje, cuando tienen lugar los vientos rasantes, que dan origen a las llamadas tolvaneras que invaden las ciudades cercanas.

Al mismo tiempo quedan desprotegidas un sin número de especies de flora silvestre y fauna local y migratoria, propias de este ecosistema, muchas de ellas están en grave peligro de extinción. Por lo que sólo mediante la restauración podría recuperarse algo de su riqueza original. Además de que actualmente es reconocida su importancia en la regulación hidráulica del Valle de México.



1.3 JUSTIFICACIÓN

La problemática de los suelos salinos es compleja y de gran importancia para el país, en cuanto al manejo, aprovechamiento y conservación de los suelos, la problemática se ha centrado en la cantidad de suelos agrícolas y de conservación, debida a su escasez, para su aprovechamiento en actividades productivas y que cubran las necesidades de las ciudades y pueblos.

En los últimos años debido a la proliferación de procesos contaminantes, entre ellos la salinización, se ha generado una disminución de tierras productivas y con ello la falta de alimento, espacio, pérdida de especies animales y vegetales, entre otros problemas de tipo social. Es por ello que este trabajo plantea una opción eficiente, económica, y que no contamina para la recuperación de los suelos que han sido afectados por la salinidad recurriendo a la especie *Mesembryanthemum crystallinum* L. Además de dar otra alternativa de tipo ecológica y a su vez aprovechar esta planta dándole distintos usos, como: el de fuente de alimento para animales y planta de ornato.



1.4 HIPÓTESIS

Mesembryanthemum crystallinum L. podrá desarrollar algún mecanismo fisiológico para desalinizar suelos salinos, lo cual si logra adaptarse a condiciones de estrés salino extremo, esta especie vegetal podría ser una nueva alternativa para la biorremediación y para la restauración de suelos salinos.



1.5 OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Evaluar si *Mesembryanthenum crystallinum* L. es capaz de disminuir las sales en el suelo del Ex – Lago de Texcoco.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar los cambios químicos (sodio, potasio calcio y magnesio) que ocurren en el suelo, antes y después del establecimiento de *Mesembryanthenum crystallinum* L.
- Cuantificar la concentración de sales absorbidas por *Mesembryanthenum crystallinum* L.
- Difundir esta especie vegetal, aprovechándola como posible opción de alimento forrajero para el ganado, planta de ornato y para consumo humano.



II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades sobre la salinidad.

La salinidad y las altas concentraciones de Sodio han influido siempre en la productividad de las tierras de cultivo. Es un problema que aqueja seriamente a la agricultura y hay que afrontarlo debidamente, con prácticas adecuadas de recuperación e investigaciones encaminadas con este fin.

Debido a las altas concentraciones de sales y al alto índice de sodicidad presente en el área del ex – Lago de Texcoco la mayoría de los suelos de la zona se clasifican como salino – sódicos, predominando en estas áreas sales como Cloruros, Carbonatos y Bicarbonatos de Sodio, los cuales se presentan en altas concentraciones en todo el perfil, variando éstas de acuerdo a la época de lluvia y de sequía observándose que en la primera la mayor concentración se encuentra en el subsuelo y en la segunda en la superficie, esto posiblemente como resultado de las altas evaporaciones que ocasionan que estas se acumulen en la superficie (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1981).

2.2 Origen de las sales.

La fuente original de donde provienen las sales del suelo y del agua, es de los minerales que se encuentran formando las rocas que constituyen la corteza terrestre. La formación de las sales se realiza mediante el proceso de intemperización (hidrólisis – solución – oxidación y carbonatación, a veces precipitación) de las rocas, donde se liberan los minerales que a la postre constituyen los suelos (De la Peña, 1985).



Según el mismo autor la salinización de los suelos generalmente ocurre en regiones de clima árido y semiárido, donde la precipitación es escasa y la evaporación elevada. Bajo estas condiciones, las aguas que se acumulan en las depresiones tienen como salida principal la evaporación hacia la atmósfera, dejando en los suelos las sales que transportaron desde las áreas circunvecinas.

Las sales acumuladas, pueden permanecer en forma solubles constituyendo entonces los suelos salinos. Sin embargo, cuando en estas sales hay una dominancia de sodio, mediante los procesos estacionales de humedecimiento y secado, este ion es paulatinamente adsorbido por el complejo de intercambio del suelo, llegando a formar los suelos sódicos.

De la Peña (1985), menciona que los iones más comunes que se encuentran presentes en la solución del suelo, son los siguientes:

Cationes	Aniones
Na^+ = Sodio	Cl^- = Cloruros
Ca^{++} = Calcio	SO_4^{--} = Sulfatos
Mg^{++} = Magnesio	CO_3^{--} = Carbonatos
K^+ = Potasio	HCO_3^- = Bicarbonatos
Fe^{+++} = Fierro	NO_3^- = Nitratos
B^{+++} = Boro	SiO_2 = Silicatos

Cuadro 1. Iones más comunes en la solución del suelo.

Los cationes más abundantes en el problema de salinidad son: Sodio (Na^+), Calcio (Ca^{++}) y Magnesio (Mg^{++}), encontrándose en menor cantidad Potasio (K^+).



2.3 Factores que favorecen la salinización.

De la Peña (1985), señala que el proceso de salinización de un suelo esta condicionado por los siguientes factores:

Aguas de mala calidad.

La salinidad del agua ha llamado la atención de los especialistas en suelos de zonas áridas desde tiempos tan antiguos como la iniciación del riego. Cualquiera que sea la fuente de agua para riego, ésta se obtiene con una cierta cantidad de sales solubles (Yaron, *et al*; 1973).

El uso de aguas salinas apresura el proceso de sales disueltas, mas cuando los riegos se aplican sin las correspondientes láminas de sobreriego o excedentes que sirven para arrastrar a través del perfil de las sales fuera del área donde se desarrolla el sistema radicular.

Aguas freáticas superficiales.

Cuando estas aguas son estáticas y con altos contenidos salinos se favorece el proceso de salinización con el ascenso capilar de las sales. Este proceso es más rápido en zonas de climas áridos donde la evaporación es intensa y las precipitaciones bajas.

Mal drenaje.

Si la permeabilidad es baja por causa de las arcillas finas, capas cementadas por Carbonato de Calcio o Sílice, se facilita la formación de mantos freáticos elevados.



El drenaje restringido es un factor que frecuentemente contribuye a la severidad de las condiciones salinas y alcalinas del suelo y que puede llevar consigo la presencia de una capa freática poco profunda o una baja permeabilidad del suelo. La capa freática poco profunda casi siempre guarda estrecha relación con la topografía del terreno (Richards, 1990).

Debido a la baja precipitación en las regiones áridas, las corrientes del drenaje superficial están poco desarrolladas y en consecuencia existen depresiones sin drenaje que impiden tener salida a corrientes permanentes (Richards, 1990).

Para subsanar las deficiencias del drenaje natural en áreas de cultivo con problemas de salinidad, es necesario la construcción de un sistema de drenaje agrícola, el cual tiene como objetivo eliminar los excesos de agua, tanto superficiales como subsuperficiales y facilitar la evacuación del exceso de sales que afectan el desarrollo de los cultivos.

La Evaporación y precipitación

La alta evaporación y bajas precipitaciones, restringen el lavado natural de las sales.

Topografía.

Las topografías accidentadas y la variación geológica y edafológica facilitan la formación de acuíferos y represamientos superficiales que incrementan el proceso de salinización.



2.4 Clasificación y descripción de los suelos según su contenido de sales.

Según los criterios establecidos por Richards (1990), los suelos se clasifican por su contenido de sales en cuatro grupos: suelos sin problemas de sales y sodio intercambiable, suelos salinos, suelos salino – sódicos y suelos sódicos.

Suelos sin problemas de sales y sodio intercambiable.

Son aquellos cuya conductividad eléctrica (C.E) es inferior a 4 mmhos/cm y su porcentaje de sodio intercambiable (PSI) menor de 15. Su pH puede variar, pero es siempre inferior a 8.4. En este caso, el contenido de sales en el suelo no constituye problema para la generalidad de los cultivos y si se presentan bajos rendimientos normalmente son atribuibles a factores ajenos a la salinidad del suelo.

Suelos salinos.

Son aquellos que tienen un Conductividad Eléctrica (C.E) mayor de 4 ms/cm en el extracto de saturación a 25 °C. su pH es generalmente de 8.5 y su PSI menor de 15. Debido al exceso de sales estos suelos casi siempre se encuentran flocculados, por lo que su permeabilidad es igual o mayor que la de suelos similares sin problemas de sales. En el campo comúnmente se les puede reconocer por la presencia de costras blancas mejor conocido como “alcali blanco” en la superficie.

Suelos salino – sódicos.

Son los suelos que contienen una C.E en el extracto de saturación a 25°C, mayor de 4 ms/cm y un PSI mayor de 15. Cuando hay exceso de sales sus partículas están flocculadas y el pH raramente es mayor de 8.5. (En el ex-Lago de Texcoco no se cumple esta norma pues la mayoría de sus suelos son salino – sódicos y presentan un



pH mayor de 8.5. Tal vez por los excepcionales contenidos de sodio soluble y adsorbido, así como los niveles de $-\text{CO}_3$ y $-\text{HCO}_3$ presentes en estos suelos.). Siempre que contengan un exceso de sales solubles, su apariencia y propiedades son similares a las de los suelos salinos, pero si se lava el exceso de sales, el suelo se volverá sódico.

Suelos sódicos.

Son los que contienen un PSI mayor de 15 y su C.E es menor de 4 ms/cm a 25 °C en el extracto de saturación. El pH generalmente varía desde 8.5 hasta más de 10, dependiendo del contenido de CO_3 , HCO_3 y el PSI presentes en el suelo. Bajo estas condiciones las arcillas del suelo se defloculan y pueden ser transportadas hacia abajo, acumulándose a poca profundidad. Con el tiempo esta acumulación puede desarrollar una capa densa y de baja permeabilidad, con estructura prismática o columnar, constituyendo el horizonte nátrico (B). Estos suelos son difíciles de laborar y a la primera lluvia o riego después de laboreo se forma una costra superficial dura y poco permeable muy desfavorable para el desarrollo de los cultivos. Cuando la sodicidad del suelo es alta, la materia orgánica dispersa puede acumularse en la superficie del suelo como especie de manchones aceitosos oscuros, en cuyo caso se le puede reconocer en el campo, por esta característica, Hilgard (Richard, 1990) llama “álcali negro” a estos suelos.



2.5 Efecto de las sales en el suelo.

De la Peña (1985), indica que las sales presentes en el suelo modifican el estado físico y químico en la siguiente forma:

- a) Modifica el estado de agregación de las partículas dando lugar a cambios en la estructura y consecuentemente se altera la aireación y retención de humedad en el suelo.
- b) Aumenta el esfuerzo de humedad del suelo.
- c) En presencia del Sodio los suelos se defloculan reduciendo la aireación, la infiltración y la Conductividad hidráulica a límites desfavorables para la planta; generalmente aumenta los valores del pH lo que puede reducir la solubilidad de los nutrientes y por lo mismo ocasionar problemas en la disponibilidad para la planta.

Efecto de las sales del suelo sobre los cultivos.

Richards (1990) indica que si un cultivo se desarrolla en suelos salinos, las plantas usualmente presentan achaparramiento con una variabilidad considerable en su tamaño, el color es verde – azul profundo y se ven manchones sin plantas. Sin embargo, el mismo autor menciona que estos indicadores no son infalibles y para un diagnóstico seguro se requiere evidencia adicional que se obtenga por pruebas analíticas del suelo y de las plantas.

Según Aceves (1999), en general las sales reducen los rendimientos de los cultivos en forma directa, variando la intensidad de la reducción de acuerdo a la tolerancia relativa de los cultivos a las sales. Este autor considera que al menos en el rango de producción de los cultivos que tiene interés económico, la respuesta puede considerarse como lineal.



En cuanto a la tolerancia relativa de los cultivos a las sales, Richards (1990) establece que se puede evaluar de acuerdo a tres criterios: a) la capacidad del cultivo para sobrevivir en suelos salinos; b) el rendimiento del cultivo en suelos salinos y c) el rendimiento relativo del cultivo en un suelo salino, en comparación con el correspondiente a un suelo no salino bajo condiciones similares. De acuerdo con estos criterios y numerosos datos experimentales, se han elaborado listas de tolerancia de cultivos a las sales, como las presentadas por Richards (1990), Maas y Hoffman (1977), donde se clasifica gran número de cultivos en tres grupos: tolerantes, semi – tolerantes y sensibles.

Respecto al sodio adsorbido, Pearson (1960) y Pizarro (1978) mencionan que algunos cultivos presentan síntomas de toxicidad en suelos de alto PSI. Por el contrario, Aceves (1999) señala que los cultivos solo responden a los elementos en solución y no a los adsorbidos. El mismo autor indica que el sodio soluble puede alcanzar niveles tóxicos y como los iones solubles están en equilibrio dinámico con los intercambiables, posiblemente ha creado confusión entre algunos investigadores quienes atribuyen efectos directos del sodio adsorbido sobre las plantas.

Efecto de las sales en las plantas.

En forma natural todos los suelos agrícolas, al igual que las aguas, contienen sales, que son utilizadas por las plantas como nutrimentos, aún cuando su uso sea selectivo y preferente, pero cuando su concentración excede ciertos límites, las sales producen daños sobre las plantas (De la Peña, 1985).

El efecto de las sales arriba del cual el crecimiento de las plantas es alterado, está en función de ciertos factores, entre los cuales cabe mencionar la textura, la distribución de las sales en el perfil, la composición de las sales y la especie y etapa en desarrollo del cultivo (Richards, 1990).



Las sales reducen los rendimientos en forma directa, variando la intensidad de la reducción de acuerdo a la tolerancia relativa de los cultivos a las sales (Aceves, 1999).

La salinidad afecta el crecimiento y producción de los cultivos al reducir el potencial hídrico de la solución del suelo, disminuyendo así la disponibilidad de agua, y al crear un desequilibrio nutritivo dada la elevada concentración de elementos como el Na^+ que pueden interferir con la nutrición mineral y el metabolismo celular. En consecuencia, los diversos efectos observados a distinta escala, desde reducción de turgencia y crecimiento hasta la pérdida de la estructura celular por desorganización de membranas e inhibición de la actividad enzimática, son el producto combinado de estrés hídrico, toxicidad iónica y desequilibrio nutricional (Hasegawa *et al*, 2000).

En el lecho del Ex – lago de Texcoco, cualquier clase de planta tiene que soportar parámetros meteorológicos extremos como: sequía seguida por inundación, alta insolación, seguida por heladas y variaciones diarias de temperatura comúnmente de 25°C . Conjuntamente con esto, la velocidad de evaporación define una fuerte transpiración y consecuentemente pérdida de agua de las plantas (Evans, 1978).

Efectos directos fuera de las plantas.

De la Peña (1985), menciona que los efectos externos directos de las sales, que afectan el desarrollo de las plantas, son los siguientes:

- Aumentan la presión osmótica de la solución del suelo por lo que reducen el abastecimiento de agua.
- Reducen la absorción de agua y por lo tanto de nutrientes.
- Retardan o nulifican la germinación.
- Crean antagonismo y toxicidad.



2.6 Efecto específico de los cuatro cationes asociados a la salinidad en la planta.

Sodio (Na^+)

De los suelos ensalitrados, aquellos que contienen cantidades excesivas de Sodio intercambiable son quizá los más problemáticos, debido a que afectan principalmente características como la textura, estructura, permeabilidad, pH del suelo y disponibilidad de los nutrientes (Pizarro, 1985).

Cuando se presentan en forma de sodio soluble puede tener un efecto directo, ya que al ser transpirada el agua por la planta ocasiona que el Sodio se vaya concentrando en las hojas, llegando a alcanzar concentraciones que resultan tóxicas para el cultivo.

El límite de tolerancia al Sodio es diferente para cada uno de los cultivos y depende en gran parte de las cantidades de Calcio presente.

Black (1968), citado por Evans (1978), indica que el Sodio actúa induciendo deficiencias de Calcio y Magnesio, debido a su naturaleza monovalente que lo hace más fácilmente absorbible. Los iones Na^+ se encuentran débilmente adheridos al complejo de intercambio y fácilmente se incorporan a la solución del suelo.

Este elemento suele presentarse principalmente en forma de Sulfatos, Cloruros y Carbonatos de Sodio.



Calcio (Ca^{++})

El Calcio tiene una función especial en la regulación de la permeabilidad de las raíces, de manera que un decremento de Calcio en la zona radical puede significar un decremento en la absorción de agua.

Este elemento por ser poco soluble resulta esencial para la planta, ya que presenta una mayor absorción que el Sodio (lo cual ocasiona una fácil sustitución o cambio) algunas soluciones de calcio son usadas para la recuperación de suelos con problemas de sodicidad, utilizando algunos mejoradores como el Yeso ($CaSO_4$), el Cloruro Cálculo ($CaCl_2$) y el Polisulfuro de Calcio (CaS_5).

El efecto de concentraciones elevadas de Calcio en suelos salinos, varía de acuerdo a la especie, presentando algunos cultivos tolerancia entre 0.5 y 3.0 % sobre materia seca.

Evans (1978), menciona que el suelo Calcio se precipita en las condiciones de los suelos sódicos con alto pH.

Magnesio (Mg^{++})

Las altas concentraciones de Magnesio frecuentemente son más tóxicas que las concentraciones isosmóticas de sales neutrales. Esta toxicidad de Magnesio se puede atenuar con la presencia de concentraciones relativamente elevadas de Calcio en el substrato (Richards, 1990).



Potasio (K^+)

No se han reportado síntomas específicos del exceso de K. Sin embargo, como la relación entre el calcio (Ca), magnesio (Mg) y K es importante, las condiciones de exceso de potasio pueden causar deficiencias de Ca o Mg (Richards, 1990).

2.7 Recuperación de suelos salinos - sodicos.

En 1982 se crea el proyecto de recuperación de suelos salinos – sódicos en México, bajo la dirección del Departamento de Salinidad y Drenaje (Vásquez y Salas, 1990).

En 1985 se establecen formas más concretas para la recuperación de dichos suelos mediante la aplicación de mejoradores químicos como Azufre, Yeso, la mezcla de ambos y Acido Sulfúrico concentrado, lo que permitió el establecimiento de algunas especies tolerantes (Vásquez y Salas, 1990).

De 1988 a la fecha se han venido realizando prácticas de recuperación de suelos, con la aplicación de mejoradores químicos logrando establecer especies cultivables como el maíz, cebada, avena, trigo, remolacha y cochia, en la zona Oriente del ex-Lago de Texcoco, donde el suelo ya presenta textura y estructura propia (Vásquez y Salas, 1990).



Aceves (1996) ofrece una recopilación de los métodos de recuperación utilizados en diversos países, agrupándolos en:

- Métodos físicos: inversión de perfil, acondicionamiento de textura, subsoleo, labranza profunda, impermeabilizantes artificiales.
- Métodos químicos: aplicación de mejoradores.
- Métodos hidrotécnicos: aplicación de láminas relativamente altas de agua (lavados).
- Métodos químico hidrotécnicos: manejo de diluciones graduales de aguas saladas, con reducción progresiva de la Conductividad Eléctrica del agua de lavado.
- Métodos biológicos: aplicación de materiales orgánicos, uso de plantas tolerantes (fitorremediación).
- Métodos eléctricos: consisten en la aplicación directa de una corriente eléctrica al suelo.

Con varias de las técnicas agrupadas como métodos físicos, así como la adición de materiales orgánicos al suelo, se persigue fundamentalmente mejorar la permeabilidad del suelo al aire y al agua, facilitando con ello las actividades de lavado; se les utiliza en suelos salinos, salino – sódicos y sódicos, pero generalmente solo como técnicas auxiliares. Por su parte la inversión del perfil puede ser útil en algunos casos de suelos sódicos, pero es una técnica muy costosa y al parecer solo ha sido utilizada en la URSS. Por lo que respecta a los métodos químicos, éstos se recomiendan para suelos sódicos y se busca con ellos introducir a la solución del suelo un exceso de cationes divalentes para que actúen en el complejo de intercambio sustituyendo al sodio adsorbido.



Métodos más usados.

Todos los métodos tienen como objetivo principal mejorar la permeabilidad del suelo y propiciar la eliminación de elementos que pueden ser tóxicos para los cultivos, lo que es condición indispensable para eliminar y propiciar los procesos de intercambio catiónico. Los métodos más comúnmente usados y efectivos son:

El lavado de suelos.

El lavado consiste en hacer pasar una cierta cantidad de agua a través del perfil del suelo para que arrastre el exceso de sales. Se ha utilizado desde la antigüedad pues según Wen citado por Aceves (1996), existen referencias de que los chinos usaban ya esta técnica antes de nuestra Era en el año 220 A.C, como tratamiento para suelos con exceso de sales. Actualmente se considera, de acuerdo con Pizarro (1978), como uno de los recursos necesarios y fundamentales en la rehabilitación de suelos ensalitrados.

Anguiano (1984), evaluó diferentes tratamientos de lavado con aguas cuyos rangos en sales varían de ligeros a altos. Se trataba de utilizar aguas negras para diluir el agua del manto freático, denominado método químico – hidrotécnico. De acuerdo a la revisión bibliográfica revisada por Anguiano el método demostró ser eficaz en la disminución de la Relación de Absorción de Sodio (RAS) y Conductividad Eléctrica de los suelos ensalitrados y por lo tanto, en la rehabilitación de suelos con problemas de sales y sodio intercambiable. Para rehabilitar los suelos y disminuir la concentración de sales se usan diluciones sucesivas cada vez mayores de las aguas freáticas.



Las conclusiones de este trabajo fueron las siguientes:

La combinación de aguas negras y freáticas tuvo un efecto positivo en la rehabilitación de los suelos salino – sódico, cuando se aplicaron láminas grandes.

De las aguas que se probaron, las negras fueron las más eficaces en la recuperación de los suelos, debido tal vez a la cantidad de materia orgánica y concentración de Calcio que contienen en solución.

El efecto del lavado disminuyó a medida que la Conductividad Eléctrica del suelo fue menor en todos los tratamientos probados.

Las condiciones del suelo, después de haber sido tratado con los lavados, fueron poco adecuadas para el desarrollo de los cultivos establecidos.

Ortega (1976), realizó una investigación sobre los cambios físico y químicos de los suelos del Vaso del ex-Lago de Texcoco, sujetos a lavados con diferentes soluciones salinas. Utilizó dos estratos de suelo del Vaso del Ex – Lago de Texcoco, uno de ellos de la profundidad de 0 – 20 cm y el otro de 20 a 100 cm. Los tratamientos se basaron en diferentes soluciones preparadas electrolíticamente con una mínima RAS y diluciones de agua freática con agua destilada.

Concluyó que el uso de soluciones con alto RAS y bajas concentraciones electrolíticas produce una serie de modificaciones en el complejo de intercambio catiónico de los suelos, lo que trae como consecuencia alteraciones en sus características químicas y mineralógicas como por ejemplo el lavado de coloides.

Además concluyó que las aguas freáticas del ex-Lago de Texcoco con sus altas concentraciones electrolíticas de 600 a 700 meq / L, ofrecen una posibilidad de uso a través de diluciones con aguas de lluvia y otras fuentes, sin que se produzcan reducciones considerables en la Conductividad Hidráulica, debiendo ser la concentración de estas diluciones hasta no menos de 25 – 30 ms / cm. Por último, que el uso de aguas freáticas



puede ser un factor importante de la reducción en la concentración de Carbonatos y Bicarbonatos en los estratos de suelo del Ex – Lago de Texcoco.

Aceves (1999), hace notar la importancia que tiene el determinar con cierta precisión la cantidad y forma de aplicación del agua de lavado, ya que generalmente se requiere de grande volúmenes y el agua es un recurso limitado en las regiones donde se presentan los problemas de ensalitramiento de los suelos. Por otro lado, al hablar de lavado generalmente se asocia con el abatimiento de las sales solubles, lo cual es correcto tratándose de suelos salinos; sin embargo, cuando se tiene un exceso de sodio adsorbido y se utiliza algún mejorador, el mismo autor indica que se debe calcular la cantidad de agua por utilizar, tomando en consideración dos criterios:

1) El agua que se requiere para abatir la C.E del suelo hasta el nivel deseado, y que se puede llamar lámina de lavado.

2) La cantidad necesaria de agua para solubilizar al mejorador utilizado, que se podría designar como lámina de disolución.

Según el grado de afectación salina en términos de C.E del suelo, variará la magnitud de los volúmenes de agua así calculados, los cuales comúnmente se expresan en centímetros de lámina.

El drenaje en la recuperación de suelos salinos - sodicos.

El drenaje del suelo es un elemento fundamental en la recuperación de suelos ensalitrados, como establecen Pizarro (1978), Aceves (1999), Richards (1990) y Yadav (1981), entre otros. La importancia del drenaje indica Aceves (1981), radica en que el lavado pierde su efectividad si las sales no son removidas del área afectada y la rapidez con que actúan los mejoradores depende, en sumo grado, de la eficiencia con que el drenaje



elimine las sales del campo. En algunos casos el suelo problema puede presentar un drenaje natural que permite eliminar los excesos de agua; sin embargo, de acuerdo con Pizarro (1978), es más común que los terrenos ensalitrados presenten condiciones inadecuadas de drenaje, por lo que los trabajos de recuperación normalmente deben incluir un sistema de drenaje artificial.

Aceves (1999), concluye que la ausencia de un eficiente sistema de drenaje ha sido la causa de ensalitramiento de los Distritos de Riego de México; así mismo, la construcción de drenes y el revestimiento de canales han sido elementos fundamentales en los trabajos de rehabilitación con que se viene combatiendo el problema en estas áreas.

En el área del ex – Lago de Texcoco no es posible construir drenes en el subsuelo que descarguen por gravedad en zonas más bajas, pues la cuenca del Ex – lago es la parte más baja de toda la zona. Por lo tanto, se construyó un sistema de drenes a cielo abierto, en donde al extremo del colector principal se tendría que re – bombear para desalojar el agua drenada. Cabe aclarar que el drenaje a cielo abierto requirió de mucho trabajo de mantenimiento, sobre todo por la poca consistencia de los taludes de los drenes.

Mejoradores químicos.

Se usan fundamentalmente en la recuperación de suelos sódicos y ocasionalmente salino – sódico y consiste en agregar sustancias químicas al suelo con la finalidad de solubilizar el calcio existente o agregarlo directamente en forma soluble, en caso de que no exista, para propiciar el intercambio catiónico y sustitución del sodio por el calcio con el complejo de intercambio, con el fin de lograr la floculación de los coloides del suelo (Aceves, 1996).



Existen varias sustancias que se usan como mejoradores, dependiendo de las características del suelo, de la velocidad deseada de recuperación y de las limitaciones económicas o costos en el mercado por equivalente químico. Entre las sustancias más comunes se tiene: sales solubles de calcio, como el cloruro de calcio (CaCl_2), y el Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), ácidos o sustancias formadoras de ácidos, como el azufre (S), el ácido sulfúrico (H_2SO_4), el sulfato ferroso (FeSO_4), el sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y el polisulfuro de calcio (CaS_5) y por último, sales de calcio de baja solubilidad, como son la calcita (CaCO_3) y la dolomita ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$) (Ortiz, 1990).

Métodos biológicos.

Estos métodos consisten en hacer uso de la materia orgánica y plantas tolerantes a las sales para proporcionar una mejora de la permeabilidad del suelo.

Como se sabe, una de las funciones de los microorganismos del suelo es la descomposición de la materia orgánica, en cuyo proceso libera una serie de compuestos orgánicos, como polisacáridos que agregan al suelo incrementando su permeabilidad, por eso en caso de suelos ensalitrados se puede usar estiércol y compostas para su recuperación. Por otra parte, durante el proceso de descomposición de la materia orgánica, los microorganismos del suelo liberan CO_2 , el cual al combinarse con el agua forma ácido carbónico, que puede solubilizar sales de calcio precipitadas en el suelo (Aceves, 1996).

El efecto sobre el sodio adsorbido se hace patente sólo en presencia de CaCO_3 , el cual reacciona con el H_2CO_3 y CO_2 producidos en la descomposición de la materia orgánica y respiración de las raíces de las plantas.

En la recuperación de suelos sódicos, la aplicación de estiércol (aún en forma líquida), ha mostrado ser muy buen auxiliar, habiéndose obtenido los mejores resultados cuando se utiliza combinado con los métodos químicos, que cuando se aplican ambos



separados. El mayor inconveniente que presenta el uso del estiércol como método de recuperación, es que debe aplicarse en grandes cantidades para que se manifieste su efecto, además generalmente solo beneficia la capa arable, de ahí que se recomienda se use en combinación con otros métodos, para aprovechar el efecto de la materia orgánica sobre las propiedades físicas del suelo y facilitar con ello, la eficiencia de otros métodos de recuperación (Aceves, 1996).

2.8 La fitorremediación.

En las últimas décadas del siglo XX surgieron tecnologías basadas en el empleo de organismos vivos para descontaminar suelos o emplazamientos contaminados y recuperar los ecosistemas afectados. Cuando estas tecnologías se basan en el uso de plantas, globalmente reciben el nombre de fitorremediación, en español se usan indistintamente otros términos como: fitorrecuperación, fitocorrección, fitorrestauración o fitorrehabilitación. Se define como el uso de plantas para eliminar los contaminantes del entorno o para reducir su peligrosidad (Salt *et al*, 1998).

La fitorremediación de suelos contaminados se basa en el uso de plantas, para enmendar, eliminar, retener, o disminuir la toxicidad de los contaminantes del suelo (Chaney *et al*, 1997). Este grupo de fitotecnologías reúne un gran número de ventajas, especialmente la limpieza y la economía; no utilizan reactivos químicos peligrosos, ni afectan negativamente a la estructura del suelo, sólo aplican prácticas agrícolas comunes; además, el proceso se realiza '*in situ*' evitando costosos transportes (Cunningham *et al*, 1995).

Estas fitotecnologías se pueden aplicar tanto a contaminantes orgánicos como inorgánicos, presentes en sustratos sólidos, líquidos o en el aire. Entre este tipo de fitotecnología se distinguen:



Fitoextracción: uso de plantas acumuladoras de elementos tóxicos o compuestos orgánicos para retirarlos del suelo mediante su absorción y concentración en las partes cosechables.

Fitoestabilización: uso de plantas para reducir la biodisponibilidad de los contaminantes en el entorno, mejorando las propiedades físicas y químicas del medio.

Fitoimmobilización: uso de las raíces de las plantas para la fijación o inmovilización de los contaminantes en el suelo. Junto con la anterior son técnicas de contención.

Fitovolatilización: uso de plantas para eliminar los contaminantes del medio mediante su volatilización.

Fitodegradación: uso de plantas y microorganismos asociados para degradar contaminantes orgánicos.

Rizofiltración: uso de raíces para absorber y adsorber contaminantes del agua y de otros efluentes acuosos.

La *fitorremediación*, por sí misma, muestra una serie de limitaciones, tales como: la localización del contaminante cercano a la rizosfera, las condiciones físicas y químicas del suelo (tales como pH, salinidad y contenido de nutrientes, que pueden limitar el crecimiento vegetal), la concentración del contaminante (que debe estar dentro de los límites tolerables para la planta), riesgos de lixiviación de los contaminantes más móviles, y accesibilidad a la zona contaminada. Por lo tanto, estas tecnologías son especialmente útiles para su aplicación en grandes superficies, con contaminantes relativamente inmóviles o con niveles de contaminación bajo, y deben considerarse procesos de recuperación a largo plazo.



Entre las ventajas que presentan estas técnicas, destaca (1) que se pueden realizar *in situ*, es decir sin necesidad de transportar el suelo o sustrato contaminado, (2) son de bajo coste, (3) permiten su aplicación, tanto a suelos como a aguas, (4) sólo requieren prácticas agronómicas convencionales, (5) actúan positivamente sobre el suelo, mejorando sus propiedades físicas y químicas, y (6) son medioambientalmente aceptables, debido a que se basan en la formación de una cubierta vegetal.

Además, cultivar plantas en un lugar contaminado y en algunos casos cosecharlas, como método correctivo es una técnica pasiva estéticamente agradable que aprovecha la energía solar y se puede usar junto con métodos de limpieza mecánicos o en algunos casos en lugar de estos últimos. Estas pueden ser para limpiar metales, plaguicidas, solventes explosivos, petróleo crudo e hidrocarburos poli aromáticos (Rock y Jackson, 1997).

El tratamiento biológico de suelos contaminados involucra el uso de vegetales para la degradación de los contaminantes orgánicos. La actividad biológica altera la estructura molecular contaminante y el grado de alteración determina si se ha producido biotransformación o mineralización. La biotransformación es la descomposición de un compuesto orgánico en otro similar no contaminante o menos tóxico, mientras que la mineralización es la descomposición a dióxido de carbono, agua y compuestos celulares (Ercolli y Gálvez, 2001).

Las plantas que toleren las concentraciones de sales existentes (antes o después de la recuperación), impiden que el agua se evapore directamente de la superficie del suelo, evitando así que las sales sean acumuladas en la superficie. Así mismo las raíces de las plantas dejan pequeños conductos por los cuales el agua circula mejor en el suelo. Por otra parte la materia orgánica o los abonos verdes, liberan nutrientes que estimulan el desarrollo de las plantas y aceleran el proceso de recuperación (Aceves, 1996).



2.9 *Mesembryanthemum crystallinum* L.

Etimológicamente, procede del griego *mesembria*, que significa mediodía y *anthemom*, que significa flor, aludiendo a que las flores de muchas especies de este género se abren hacia el mediodía. (Ver figura 1.)



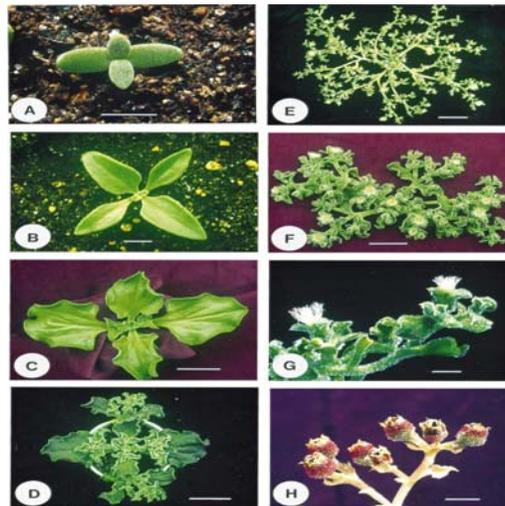
Fig. 1. Flor de *Mesembryanthemum crystallinum* L. después de medio día (foto con una cámara fotográfica Sony Cyber – shot DSC – W35).

Es una especie introducida de África, de la Familia: *Aizoaceae*, en el orden *Caryophyllales*, el Género *Mesembryanthemum* cuenta con 25 especies, distribuidas principalmente en el hemisferio norte, sur de África y Australia. Es una planta halófito, suculenta cubierta por células epidérmicas llamadas células de la vejiga, dando un aspecto distintivo que reluce, por eso es llamada “ice – plant” ó planta escarchado o de hielo. Su fisiología única y la capacidad de acumular la sal le han permitido establecerse en áreas perturbadas y salinas a través de Australia Meridional. Esta planta crece a lo ancho, aproximadamente 1 m (Jacobs e Highet, 1990). *Mesembryanthemum crystallinum* L. puede ser una planta anual, bienal o perenne, pero su ciclo vital se termina generalmente dentro de



varios meses, dependiendo las condiciones ambientales, su época de floración es en los meses de Abril, Mayo, Junio y Julio, las flores se abren por la mañana y se cierran por la noche, son polinizadas por los insectos (Bohnert y Cushman, 2000). Puede adaptarse a una amplia gama de tipos de suelo desde: arenosos bien drenados, incluyendo dunas de arena, hasta suelos de altos contenidos de arcillas. Aunque prefiere suelos poco ácidos o neutros, pero puede tolerar los suelos salinos (Canberra, 2004).

Mesembryanthemum crystallinum L. acumula la sal durante su vida, en un gradiente de las raíces a los tallos, con la concentración mas alta almacenada en las células de vejiga. Las hojas de *M. crystallinum* son comestibles al igual que las semillas, sirve como ornamental de jardín. Debido a su acumulación de sal, *M. crystallinum* puede ser útil para la bio-remediación (Bohnert y Cushman, 2000).



Cuadro 2. Crecimiento del *Mesembryanthemum crystallinum* L. (A) Plantula con un par primario de hojas. (B) Planta juvenil (3 semanas). Las hojas primarias son lanceoladas. Ya son mas visibles. (C) Transición de juvenil al crecimiento adulto. Se desarrollan todas las hojas primarias y los tallos laterales emergen. (6 semanas). (D) Planta adulta (8 semanas) Las hojas primarias han alcanzado su completo desarrollo; el crecimiento adicional se observa con los tallos laterales. (E) Planta adulta (12 semanas). (F) El tamaño depende de la época y comienzo del estrés del medio. La planta fue creciendo en medio salino. Las plantas fueron sometidas a estrés salino desde las tres semanas de su germinación. La edad de la planta es de 12 semanas. (G) Rama floreciente de una planta de 12 semanas. (H) Ramificación con las cápsulas de la semilla, las cápsulas de la semilla son viables, muestran una pigmentación rojiza (Bohnert y Cushman, 2000).



2.10 Adaptación a las condiciones salinas.

Para lograr la adaptación por parte de la planta a condiciones de estrés salino se deben activar múltiples mecanismos: debe aumentarse la capacidad de obtener y/o retener agua, y debe restituirse la homeostasis iónica. Estos mecanismos de adaptación se reflejan macroscópicamente como un menor crecimiento, modificación de la relación parte aérea/raíz, limitación de la expansión foliar, y son consecuencia de cambios fisiológicos (alteración de la permeabilidad de las membranas a los iones y al agua, cierre estomático, disminución de transpiración y fotosíntesis).

Esta respuesta adaptativa está gobernada por señales moleculares que regulan la relación con el medio externo (por ejemplo, cambios en la actividad de canales y transportadores de membranas) y por la activación y transcripción de genes entre cuyos efectos está la modificación de rutas biosintéticas que resultan en ajuste osmótico y la protección de las estructuras celulares.

Absorción de agua.

Uno de los efectos más evidentes del estrés salino es la reducción en la capacidad de absorción de agua, que se puede manifestar como los efectos del estrés hídrico: reducción de expansión foliar y pérdida de turgencia. Una célula vegetal expuesta a un medio salino equilibra su potencial hídrico perdiendo agua, lo que produce la disminución del potencial osmótico y de turgencia. Esta situación genera señales químicas (aumento del Ca^{2+} libre intracelular, síntesis de ABA, etc.) que desencadenan posteriores respuestas adaptativas (Hasegawa *et al*, 2000).

Durante el proceso de ajuste se produce la acumulación de solutos orgánicos e inorgánicos que reducen el potencial osmótico celular (Wynjones y Gorham, 1983), y la reducción en la conductividad hidráulica de las membranas, posiblemente por disminución



del número o apertura de los canales de agua (acuaporinas) (Carvajal *et al*, 1999). Una vez recuperada la turgencia, se puede restablecer el crecimiento (Jacoby, 1994).

Los cambios macroscópicos que se observan bajo condiciones de salinidad, como reducción del área foliar y de la relación parte aérea/raíz, entre otros cambios también reflejan el ajuste necesario para recuperar el balance hídrico. Por la importancia de los flujos hídricos en los procesos de ajuste osmótico celular, la actividad de las acuaporinas debe jugar un papel clave entre los mecanismos de adaptación al estrés (Maurel y Chrispeels, 2001).

Algunos autores (Maurel *et al*, 1997) han sugerido que la regulación de las acuaporinas de plasmalema y tonoplasto tendría un papel en los procesos de osmoregulación celular. Frente al estrés salino se observa el aumento de succulencia (Ashraf, 1993; Leidi y Sáiz, 1994; Reimann y Breckle, 1995), adaptación desarrollada aparentemente más para la reducción de la pérdida de agua que para el mantenimiento de la actividad fotosintética (Fischer y Turner, 1978; Longstreth y Nobel, 1979).

Absorción de iones.

En un suelo salino, la elevada concentración de iones Na^+ , produce una interferencia en la absorción de nutrientes (K^+ , Ca^{2+} , NO_3^-) e impide su captación, al tiempo que pueden alcanzar niveles citosólicos tóxicos para el metabolismo celular. El mantenimiento del equilibrio iónico de la célula frente a los cambios del medio externo, esto es la homeostasis iónica, depende de las proteínas de membrana que regulan el flujo de iones, como las bombas de protones (ATPasas y pirofosfatasas), transportadores secundarios y canales iónicos (Figura 1) (Niu *et al*, 1995; Maathuis y Amtmann, 1999).

Uno de los factores determinantes de la tolerancia celular a la salinidad reside en la capacidad de mantener una alta relación K^+/Na^+ en el citosol. Un caso aparte lo constituye la entrada de aniones, que pueden interferir con la absorción de nutrientes como Ca^{2+} y



NO_3^- e inducir deficiencias, o bien presentar distinto grado de toxicidad (Cl^- o SO_4^{2-}) (Grattan y Grieve, 1994).

La raíz, como principal órgano de absorción de agua y iones, tiene gran importancia en la respuesta a corto y largo plazo al estrés salino. En este órgano se sintetiza ácido abscísico (ABA), una de las señales tempranas de estrés capaz de producir cambios fisiológicos locales (conductividad hidráulica) y a distancia (cierre estomático). Las características anatómicas y morfológicas de la raíz pueden tener gran influencia en la capacidad de adaptación a la salinidad (Hartung *et al*, 2002).

La entrada de K^+ y Na^+ en la célula se produce por la acción de transportadores y canales iónicos del plasmalema. Existen transportadores muy selectivos para el K^+ , con una elevada afinidad por K^+ (10-50 mM), pero que también pueden transportar Na^+ con baja afinidad y ser bloqueados por altas concentraciones de Na^+ en el medio. Entre estos transportadores están los de tipo KUP-HAK de cebada y *Arabidopsis*. Por el contrario, Los transportadores de HKT manifiestan una alta afinidad por Na^+ y en sistemas heterólogos se comportan como simportes Na^+/K^+ o uniportes de Na^+ . Su función fisiológica es incierta pero la evidencia genética indica que la proteína HKT1 de *Arabidopsis* es una vía sustancial de entrada de Na^+ en la planta. El transportador de baja afinidad, LCT1, también es permeable al Na^+ , pero su contribución relativa a la captación de Na^+ es desconocida (Maathuis y Amtmann, 1999).

Tolerancia de la planta al estrés salino.

La tolerancia de la planta a la reducción de su producción por salinidad es un carácter complejo, que involucra respuestas al estrés iónico y osmótico a nivel celular, la coordinación de esas respuestas a nivel de organismo y su interacción con el medio circundante. Los mecanismos que confieren tolerancia a nivel celular pueden no tener efecto a nivel de planta. En la planta se asocian células diferenciadas con distinta función (absorción, transporte, asimilación de carbono), y espacialmente separadas y enfrentadas a



condiciones ambientales distintas. Ya se ha mencionado la importancia de la morfología y anatomía radical, y no es menor la importancia de la morfología foliar, y de las distintas variables ambientales que pueden modificar la absorción de iones (Hartung *et al*, 2002).

III. Localización y Descripción del Área de estudio.

El área de estudio se encuentra en las coordenadas 19°, 27', 06" L. N y 98°, 54', 42" L. O, localizada dentro de las instalaciones del Colegio de Postgraduados, Campus Texcoco, Estado de México (Ver Mapa, figura 2.). La mayor parte de la zona se encuentra cubierta por suelos Solanchak de diferentes subunidades, predominando los suelos Solanchak gleyco, que son suelos salinos, propensos a acumular el salitre y poseen un alto contenido de sales y su vegetación está formada por pastizales o plantas que toleran el exceso de sal.



Fig. 2. Toma satelital del Colegio de Postgraduados, área de estudio (Google Earth, 2007).

Otro tipo de suelo que se localiza en la zona es el Cambisol eútrico, se caracterizan por presentar en el subsuelo una capa que parece más suelo de roca ya que en ella se forman terrones, además pueden presentar acumulaciones de algunos materiales como arcilla, carbonato de calcio, fierro, manganeso, etc., pero sin que sea una acumulación muy abundante. El clima es templado semiseco, con una temperatura media anual de 15.3°C, con heladas poco frecuentes y una precipitación pluvial media anual de 603.5 mm. Sus vientos dominantes son del sur.



3.1 Caracterización del ex – Lago de Texcoco.

Localización Geográfica y Superficie.

El ex-Lago de Texcoco se encuentra en una cuenca cerrada de la Mesa Central de la República Mexicana. Se ubica entre las coordenadas 19°, 22' y 19°, 37' de Latitud Norte y 98°, 54' a 99°, 03' de Longitud Oeste, con una altitud media de 2236 a 2240 m.s.n.m. (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1981).

Geología.

La cuenca se formó a consecuencia del levantamiento de las rocas cretácicas a fines de la Revolución Larámide, levantamiento que permitió la formación de un Lago. En el terciario se subdividió la cuenca, y la intensa actividad volcánica en este Periodo originó la formación de anhidrita y abundantes depósitos volcánicos. Posteriormente, entre el Oligoceno Superior y el Mioceno Superior se supone que ocurrió el relleno de la cuenca en un espesor de más de 1000 metros.

Los materiales geológicos desde la superficie del lago hasta los 180 metros de profundidad, están constituidos por materiales predominantemente arcillosos, aunque también existen lechos arenosos y limosos. Los sedimentos orgánicos se presentan en una pequeña proporción, quizá porque las condiciones de alta salinidad limitaron fuertemente el desarrollo de vegetación abundante, los suelos del ex – Lago de Texcoco son de origen aluvial – lacustre y se desarrollaron a partir de sedimentos, producto de la alteración de rocas ígneas (Gutierrez, 1997) .



Clima.

El área del ex – Lago de Texcoco se encuentra situada al sur del paralelo 20 Norte, por lo que geográficamente queda comprendido dentro de la zona intertropical, pero por encontrarse a una altitud mayor de 2,000 m.s.n.m. presenta características de zona templada.

Según el sistema de Koppen, el clima es BS, kw semiseco, con verano fresco (temperatura media del mes más caliente menor de 18°C) y lluvioso en invierno con un total de lluvia del 5 % del total anual.

De acuerdo con el segundo sistema de Thornthwaite, indica que el clima de la zona corresponde a un C1dB2O, semiseco con poco o nulo excedente de agua, templado frío con baja concentración térmica en el verano (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1981).

Precipitación.

Existen dos épocas bien marcadas, una de lluvias de Mayo a Octubre y la otra de sequía de Noviembre a Abril.

Periodo de lluvias (6 meses)530.1 mm87.8 %
Periodo de sequía (6 meses) 73.4 mm12.2 %
Precipitación media anual603.5 mm100 %

Las lluvias son irregulares y por lo general de tipo torrencial, siendo Julio el mes más lluvioso y Febrero el más seco.



Temperatura.

La temperatura media anual es de 15.3° C.

La temperatura máxima extrema anual es de 36.0° C.

La temperatura mínima extrema anual es de – 11.0° C.

Evaporación.

Se han obtenido valores de evaporación máxima de 2453.8 mm y una media anual de 1,801 mm (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1981).

Vientos.

Los vientos que afectan la zona se pueden clasificar en tres tipos: de altura, rasantes y convectivos. Los vientos rasantes con velocidades de 2.3 hasta 4.1 m/s y los convectivos son los responsables de las tolvaneras que afectan la ciudad de México (Macias, 1982).

Heladas.

Son frecuentes en los meses de Noviembre a Abril inclusive, siendo – 11° C la temperatura más baja que se haya registrado en la zona (Macias, 1982).

Hidrología.

Existen alrededor de 15 afluentes que alimentan el ex – Lago de Texcoco; la mayoría de ellos intermitentes, de los cuales el Río Churubusco descarga gran cantidad de aguas negras y pluviales provenientes de la ciudad de México que inundan pequeñas porciones del lecho. Otro tanto ocurre con las aguas negras de Cd. Netzahualcoyotl que se



bombean al lago. Las extracciones de agua del área del ex – Lago se realizan por medio de un canal denominado de sales.

Los acuíferos de la zona del Ex – Lago son de alta concentración salina debido a que se ha determinado que todos los estratos geológicos hasta una profundidad de 2,065 metros presentan diferentes contenidos de sales (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1981).

Suelos.

El problema fundamental del área del ex – Lago de Texcoco radica en los suelos. Estos constituyeron durante muchos siglos el lecho del Lago, en el cual se depositaron sedimentos volcánicos y fluviales y donde, por ser una cuenca cerrada con elevada evaporación, se acumuló gran cantidad de sales. Con la desecación artificial del Lago se dejó al descubierto una superficie de terreno de aproximadamente 150 km², cuyos suelos se componen de un material altamente hidratado, que presenta un contenido extremadamente alto de sales solubles y sodio intercambiable, así como un nivel somero de aguas freáticas saladas y un drenaje interno y superficial muy pobre, condiciones por las cuales no fue posible la colonización vegetal natural en gran parte del área (Velásquez y Luna, 1981).

Los suelos de la zona se han formado a partir de materiales provenientes de las serranías circunvecinas y cerros aislados que, mediante arrastre aluvial o eólico se han venido acumulando en capas. Dichos materiales son principalmente de origen ígneo intrusivo y extrusivo, representados por cenizas volcánicas, basaltos, andesitas, tobas y brechas. Algunos de los suelos parecen muy evolucionados pero en cambio en otros se han podido observar estratos de cenizas volcánicas sin intemperizar (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1981; Macias, 1982).



Salinidad y Sodicidad.

Existen en la zona una inmensa gama de suelos que comprende desde no salinos, no sódicos, hasta salino – sódicos; pero generalmente los que predominan son los salino – sódicos que comprenden las zonas que contienen pastos y vegetación (Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1981; Macias, 1982).

Vegetación.

Actualmente las principales comunidades vegetales del ex-lago de Texcoco son:

- Pastizal de *Distichlis spicata* L. (pasto salado)
- Comunidad de *Suaeda nigra* L. (romerito)
- Pastizal de *Eragrostis obtusiflora* Fourn (zacahuixtle)

Desde 1957 Rzedowsky menciona que el pasto *Distichlis spicata* constituye la comunidad más extendida en la zona, presentándose como un anillo que rodea a la porción central desnuda del lago y limitando su avance hacia el centro del mismo por la elevada salinidad y alcalinidad de los suelos.

En la actualidad, gran parte del área que anteriormente estaba desnuda ha sido paulatinamente cubierta con pasto salado (*Distichlis spicata* L.), lo cual ha sido posible gracias a las características particulares del pasto que lo hacen tolerante a las condiciones inhóspitas que prevalecen en el área.



IV. MATERIALES Y MÉTODO

Con la finalidad de que los objetivos planteados, sean resueltos de la mejor manera y sean confiables los resultados, se procedió a utilizar las siguientes técnicas en la presente investigación.

Se escogió una zona del ex-Lago de Texcoco, con problemas severos de salinidad, la cual se ubica en las coordenadas 19°, 27' y 60" L.N y 98°, 54' y 59", el terreno fue delimitado con postes para transplantar 60 plántulas de la especie *Mesembryanthemum crystallinum* L.

Antes de trasplantar las plántulas se tomaron 60 muestras de suelo del área delimitada aproximadamente a 60 cm de profundidad para su análisis y se realizaron las determinaciones que muestra el cuadro 3, para conocer el estado inicial del suelo en cuanto al contenido de sales, y para evaluar el efecto de la planta y su aplicación como mejorador una vez concluido el tratamiento.

PARÁMETRO	TÉCNICA UTILIZADA
PH	Potenciómetro en el extracto de saturación
C.E	Conductímetro en el extracto de saturación
Ca + Mg	Titulométrico titulación con EDTA del extracto
Na	Espectrofotómetro de flama
K	Espectrofotómetro de flama

Cuadro 3. Técnicas analíticas (Jackson, 1964).



Para estimar el efecto del tratamiento sobre las variables químicas del suelo se realizó una comparación en cada variable, evaluando desde la etapa inicial, hasta la etapa final del experimento. El muestreo de suelo posterior a la cosecha se realizó de la misma forma que al inicio del experimento, tomando 60 muestras de cada surco a una profundidad de 60 cm. Las variables fueron las mismas que al inicio: pH, C.E, calcio, magnesio, sodio y potasio.

Material vegetal y condiciones de crecimiento.

Las semillas de *M. crystallinum* se germinaron en suelo (Metro Mix 500) en charolas de propagación (Ver figura 3.) bajo condiciones de invernadero (17 a 28 °C). Sesenta plántulas de tres semanas de edad fueron transplantadas en el área de estudio (se limpio y enjuago la raíz con agua destilada, evitando que quedara sustrato adherido a esta), en un espacio en campo de aproximadamente 10m X 10m. 60 plántulas, en 6 filas, cada fila con 10 plántulas. Se hicieron observaciones dos veces a la semana, para su desarrollo y regarlas.



Fig. 3. Plántulas de tres semanas de edad, en charolas de propagación, listas para trasplantar.



Al observar que la planta creció y se adaptó al medio, en tres meses (12 semanas) se procedió a cosechar las plantas, enjuagando la raíz con agua destilada para su posterior análisis químico. Posteriormente fueron tomadas las muestras de suelo del surco de cada planta, para su análisis



Fig. 4. Plántula de 3 semanas de edad trasplantada al área de estudio.



Fig. 5. Suelo del área antes de montar el experimento.

Conductividad eléctrica del extracto de saturación.

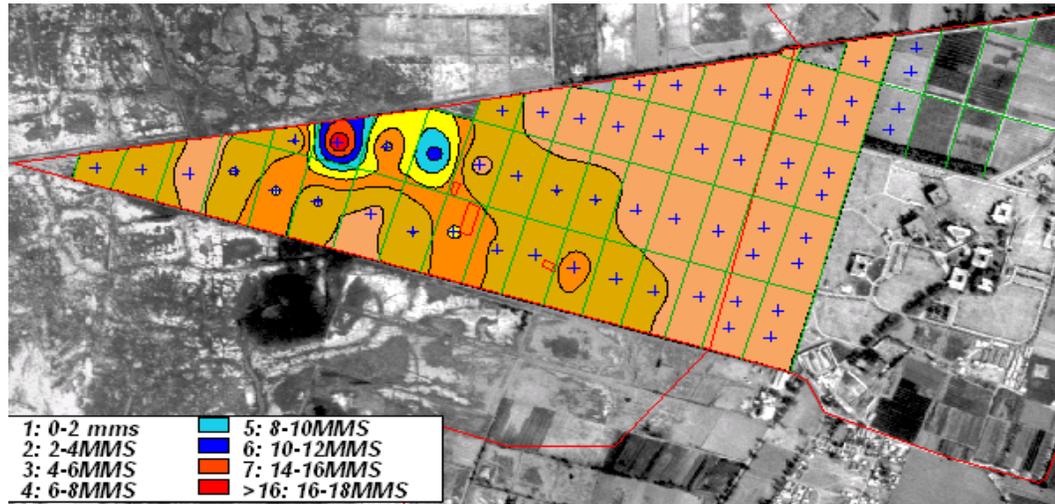


Fig. 6. Mapa de la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica en mmhos de los terrenos del colegio de postgraduados.

Análisis de plantas para la cuantificación de Ca, Mg, Na, K.

Se tomaron en cuenta para el análisis, las plantas que no mostraron signos de marchitamiento. En cuanto a estructura, toda la planta fue tomada para su análisis.

PARÁMETRO	TÉCNICA UTILIZADA
Calcio	Solubilización por digestión con ácido nítrico y perclórico (HNO ₃ /HClO ₄)
Magnesio	
Sodio	
Potasio	

Cuadro 4. Técnicas Analíticas para el material vegetal.



V. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

El porcentaje de sobre vivencia de *Mesembryanthenum crystallinum* L. bajo las condiciones en que se realizó el trasplante y las demás evaluaciones fue aceptable y exitoso, ya que no se mostraron signos de marchitamiento o pérdida total de todas las plantas considerando que el terreno donde se realizó el experimento no había sido forestado o cultivado con anterioridad, además de mostrar cierto descuido y deterioro, esto por las severas limitantes de su suelo. El cuadro 4 muestra la tasa de sobre vivencia de la planta.

No. De plantas transplantadas.	No. De plantas vivas hasta el final del experimento.	% de sobre vivencia.
60	33	55 %

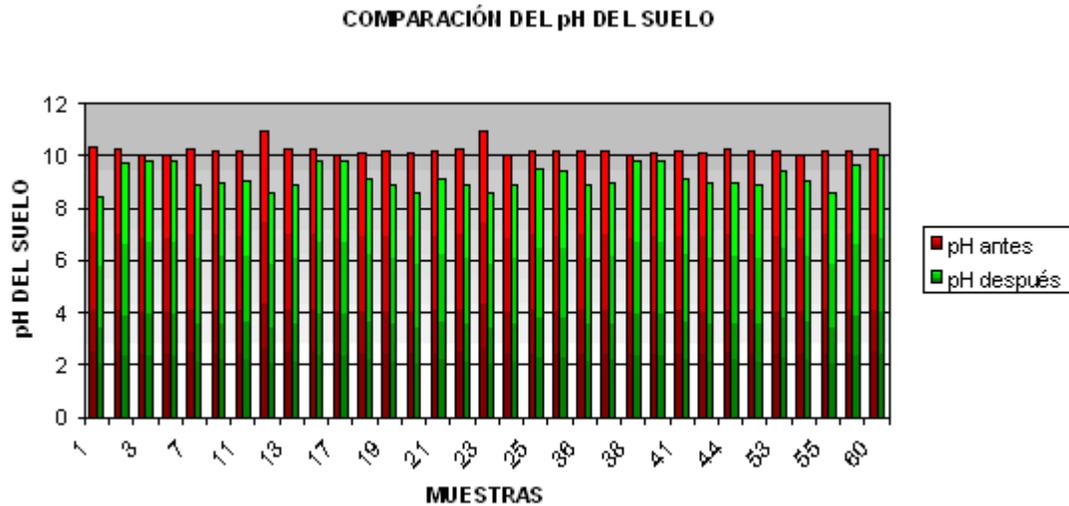
Cuadro 4. Plantas que fueron transplantadas para el experimento, % de sobre vivencia.

Con respecto a la variabilidad en estos datos, es posible que la causa fundamental sea la gran heterogeneidad en las condiciones de suelo, manipulación de la planta y tiempo bajo las cuales se trabajo.

Los resultados obtenidos fueron representados gráficamente, haciendo una comparación del antes y después del tratamiento con *Mesembryanthenum crystallinum* L. Esto para observar los cambios físicos y químicos ocurridos en el suelo. Para corroborar los resultados los datos obtenidos se someterán a un análisis de varianza con un diseño estadístico completamente al azar, y una comparación de medias, empleando el paquete estadístico Stat Graphics versión 9.1.



pH



Graf. 1. pH del suelo del área experimental, antes y después de hacer el tratamiento con *Mesembryanthemum crystallinum* L.

Como se observa en la grafica 1, la concentración de sales, es muy severa, dando como resultado un elevado pH de 10 y >10. Estas concentraciones muestran que la salinidad de este tipo de suelos son muy característicos de áreas con vegetación halófila. Lo cual muestra que *Mesembryanthemum crystallinum* L. se adapta favorablemente a estas condiciones de estrés salino. En la gráfica 1 se observa claramente un cambio favorable, bajando el pH en algunos casos de 10.29 a 8.45 y en otros casos de 10 a 9, es notable el cambio en las muestras donde estuvo presente *Mesembryanthemum crystallinum* L. A lo contrario de lo que sucede en las muestras donde hubo ausencia de la planta como se observa en la gráfica 2.

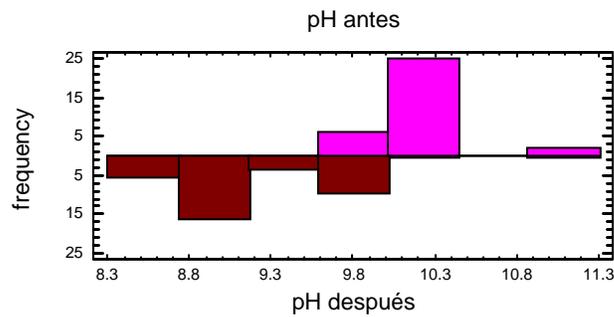
Esta reducción indica una significativa mejora de las condiciones del suelo desde el punto de vista agronómico, pues la mayoría de los cultivos presentan su mejor desarrollo en rangos de pH relativamente estrechos y cercanos a la neutralidad. Aunque es cierto que estos resultados no muestran pH cercanos a la neutralidad, es un hecho que el tratamiento



con *Mesembryanthenum crystallinum* L. ha dado resultados favorables, que permitirían seguir empleando este tratamiento, para obtener resultados aun más favorables.

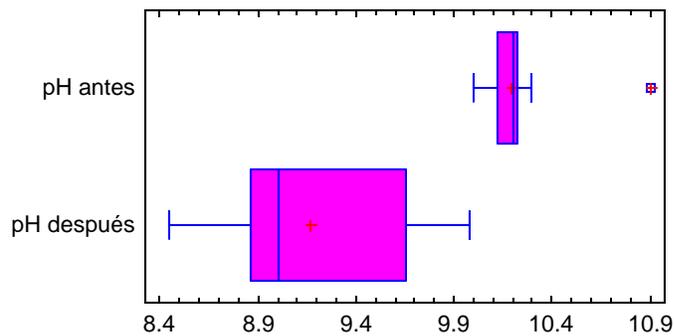
El cambio significativo se corrobora con la siguiente prueba estadística:

Comparación estadística pH



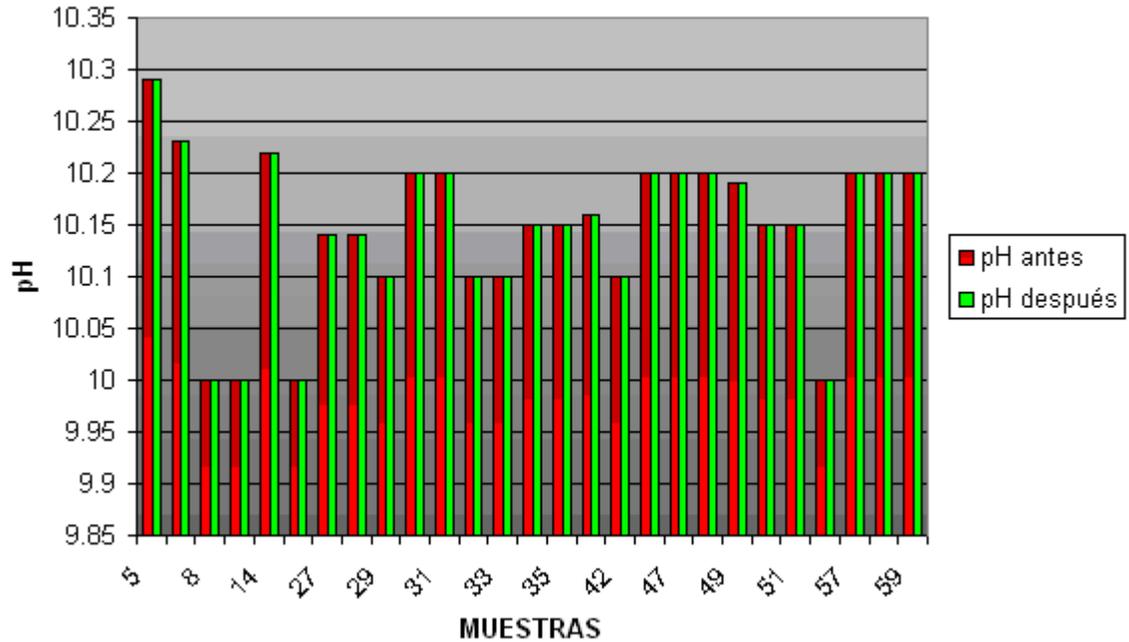
Se observa que hay una gran diferencia en el cambio de pH donde los valores finales tienen una gran disminución con respecto al principio donde los valores eran muy elevados.

Box-and-Whisker Plot





pH EN EL SUELO (SIN CAMBIOS)



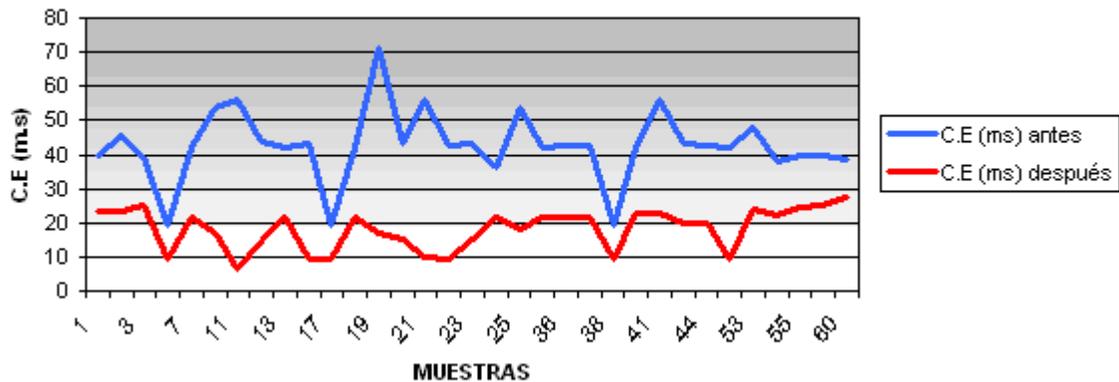
Graf. 2. Muestras de suelo que no tuvieron cambio en el pH, debido a la ausencia de *Mesembryanthenum crystallinum* L.

A diferencia de la gráfica 1, la gráfica 2 muestra que no existe ningún cambio en el pH del suelo, esto debido a que en estas muestras *Mesembryanthenum crystallinum* L. se marchito, provocando una ausencia total en estos surcos.



CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

COMPARACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO



Graf. 3. Comparación de la conductividad eléctrica del suelo del área de estudio.

Con respecto a la conductividad eléctrica como lo muestra la gráfica 3 es notable que al igual que el pH también existe un cambio significativo, disminuyendo las concentraciones de C.E. de las muestras donde estuvo presente *Mesembryanthenum crystallinum* L., se observa que en donde existe conductividades de hasta 70 ms disminuyen a 20 ms aproximadamente, en algunas muestras la conductividad no es tan alta como es el caso de la muestra 7 por ejemplo, donde la conductividad es aproximadamente de 20 ms, pero al igual que en las demás muestras, también se registra un cambio, bajando la conductividad en este caso a 10 ms. En la mayoría de las muestras donde estuvo presente *Mesembryanthenum crystallinum* L. se observan cambios notables en la C.E, algunos muy bruscos, y grandes, aunque otros son menos evidentes y el cambio no es tan severo.

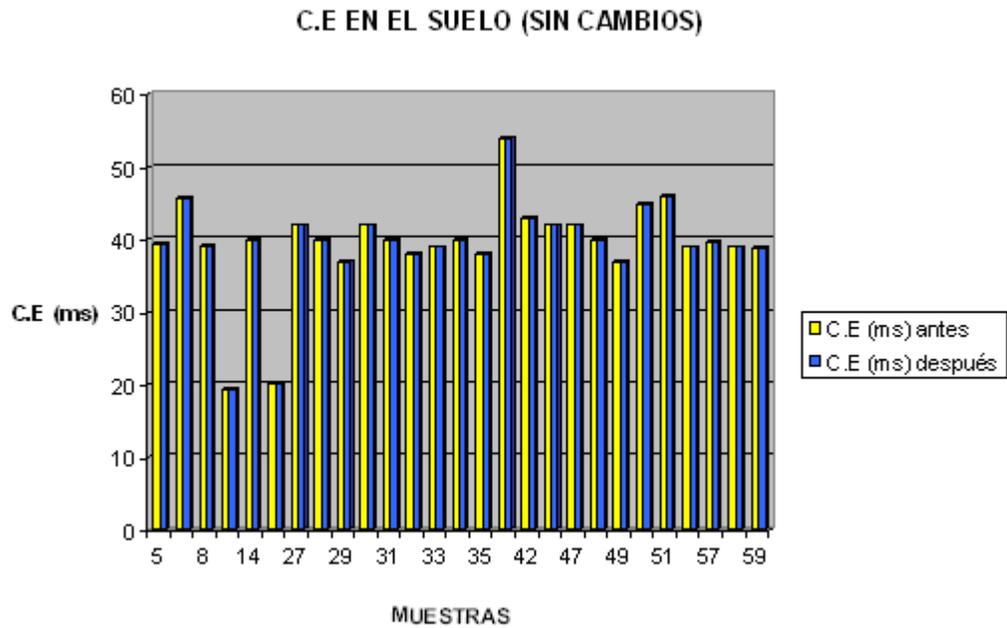
Es importante aclarar que inicialmente la conductividad eléctrica (C.E) promedio del suelo en el sitio experimental era de 39.45 ms, disminuyendo a 18.20 ms. Aunque el aspecto general del sitio en cuanto a morfología del suelo y vegetación nativa era muy homogénea, la C.E y demás variables químicas del suelo mostraron una heterogeneidad



inicial relativamente alta. Como puede verse, la presencia de *Mesembryanthenum crystallinum* L. causó un notable decremento en la C.E. Posterior al tratamiento se abatió la C.E, de tal manera que si se obtienen niveles más bajos, para propósitos de agricultura no se presentarían problemas para un buen desarrollo de cultivos medianamente tolerantes a las sales.

Así pues, donde hubo una ausencia total de *Mesembryanthenum crystallinum* L. la C.E final era prácticamente igual que al inicio del experimento, mientras que en las partes donde hubo presencia de la planta, se observó un gran cambio eliminando un exceso de sales.

Estos resultados son interesantes pues en todo trabajo de recuperación de suelos que tienen problema de sales, la C.E es uno de los indicadores más comúnmente utilizados para medir el grado de mejoramiento del suelo y frecuentemente se le concede mayor importancia que a otras propiedades químicas y/o físicas del suelo que también podrían ser usadas con el mismo objeto. Si en el presente estudio la C.E hubiese sido la única variable de respuesta utilizada, la conclusión sería lógica, es decir el uso de *Mesembryanthenum crystallinum* L. indicaría ser un buen recuperador de estos suelos; sin embargo se tienen que analizar otras variables para poder corroborar esta conclusión.

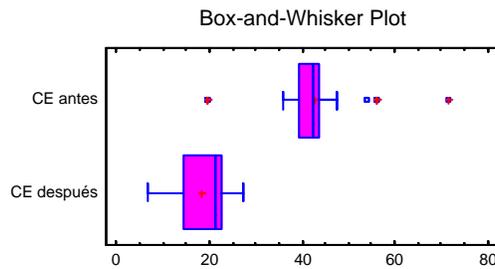
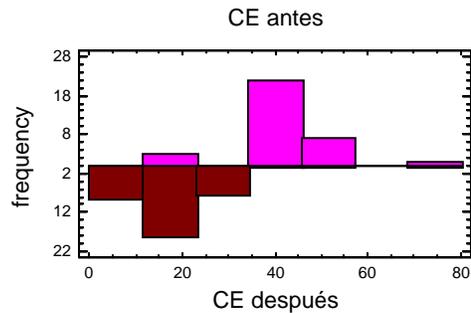


Graf. 4. Muestras donde no existe ningún cambio en la C.E, por ausencia de *Mesembryanthenum crystallinum* L.

Al igual que en el pH en la gráfica 4 es notable la ausencia de cambios en la C.E del suelo, en estas muestras se puede observar que las concentraciones en la C.E se mantienen iguales, sin tener ni una mínima disminución o cambio, esto debido también a la ausencia de la planta en estas muestras.



Comparación de la conductividad eléctrica

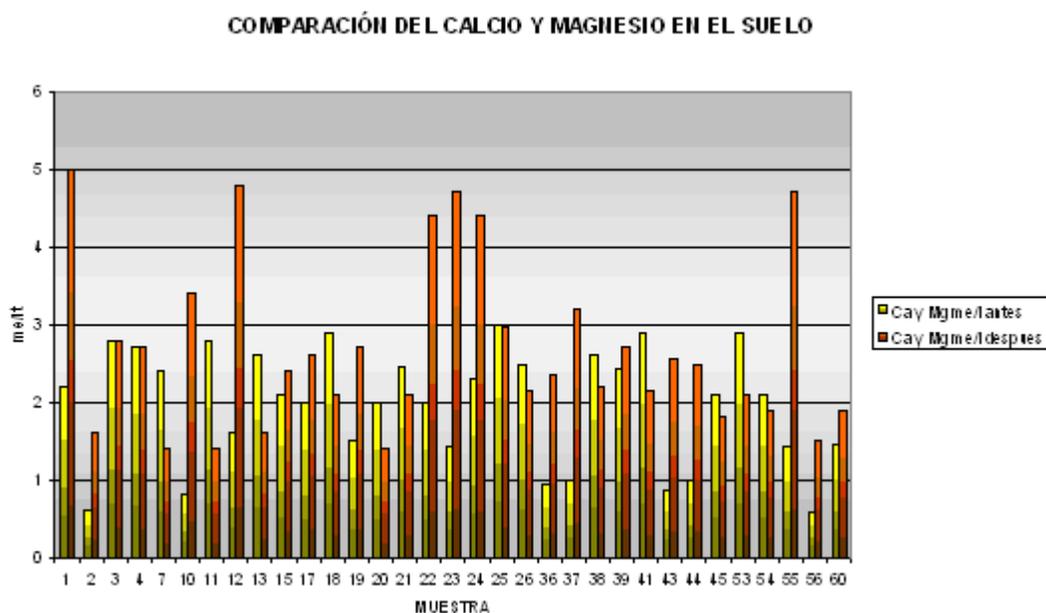


Potasio, Sodio, Calcio y Magnesio.

Estos cuatro elementos fueron tomados en cuenta para su análisis ya que son de los más importantes y que se presentan en abundancia en el problema de la salinidad, además algunos de ellos en grandes cantidades causan daños a los cultivos y plantas como es el caso del Sodio. Otros como el Potasio en abundancia son esenciales para las plantas, y Algunos como el Calcio y Magnesio deben de estar en proporciones equilibradas para no ser tan dañinos a las plantas o cultivos.



CALCIO Y MAGNESIO



Graf. 5. Cambio en las concentraciones de Calcio y Magnesio.

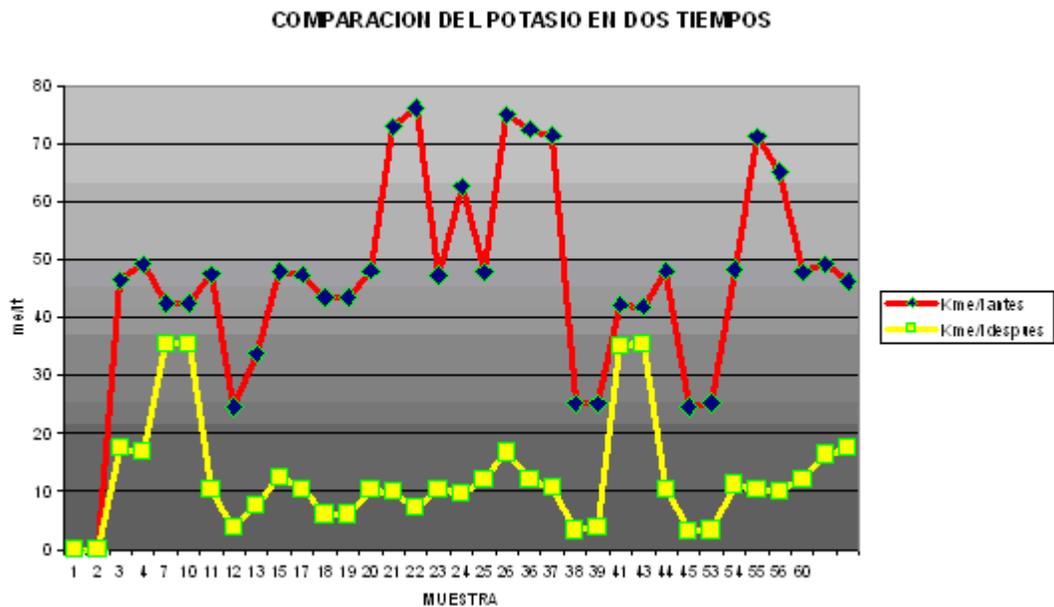
El principal objetivo que se persigue al tratar de restaurar un suelo con problemas de salinidad y principalmente exceso de sodio es propiciar que el calcio y el magnesio desplacen al exceso de sodio, mejorando con ello las condiciones del suelo.

En el sitio experimental, las concentraciones promedio de calcio y magnesio antes del tratamiento con *Mesembryanthenum crystallinum* L. era de 1.96 me/L, que representaba en conjunto el 1 % de los cationes analizados. Al concluir con el tratamiento se registró un aumento donde los valores fueron de 2.67 me/L, en promedio, constituyendo el 4 % de la suma de los cationes. El aumento de la concentración de calcio y magnesio se debió a la acción de la planta como se puede ver y ocurrió básicamente solo en los sitios donde *Mesembryanthenum crystallinum* L. estuvo presente. Mientras que en los sitios donde la planta no tuvo éxito de sobrevivir, no se obtuvo ningún cambio en las concentraciones,



dando como resultado los mismos valores que al inicio del experimento y antes de transplantar.

POTASIO

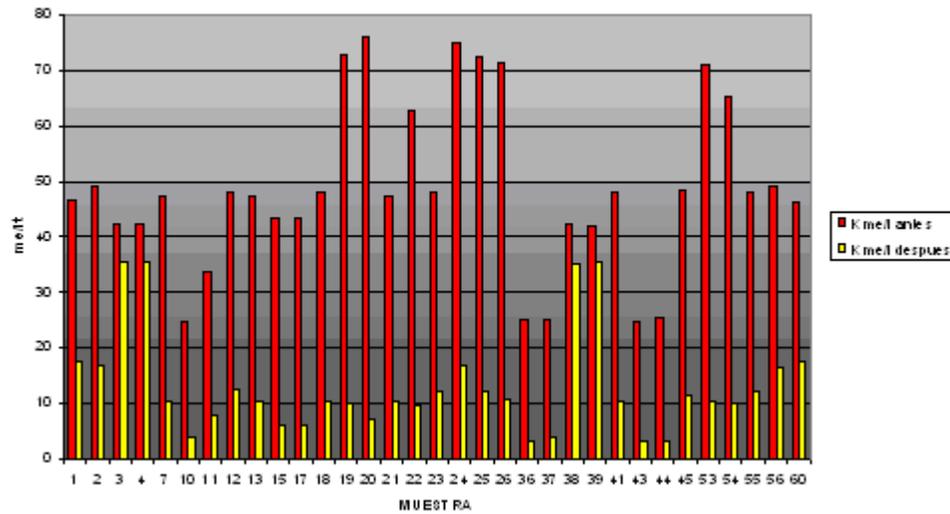


Graf. 6. Potasio en el suelo.

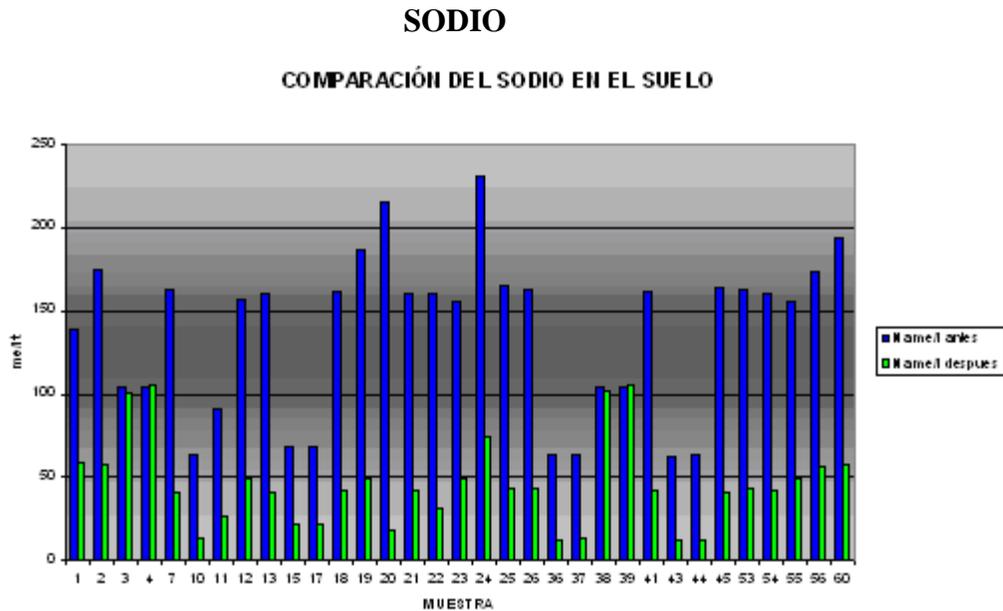
Por otro lado, el tratamiento provoco también un decremento importante en la proporción del potasio, ya que en las muestras tomadas antes de iniciar el tratamiento se tenían valores promedio de 48.574 me/L, al transplantar la planta y finalizar el tratamiento se obtuvieron resultados interesantes los cuales en promedio fueron de 13.120 me/L, de tal manera que esto nos indica que *Mesembryanthenum crystallinum* L., al igual que el sodio, absorbió de buena manera y en gran proporción el potasio.



COMPARACION DEL POTASIO EN DOS TIEMPOS



Graf. 7. Notable disminución de Potasio en el suelo.



Graf. 8. Concentraciones de Sodio en el suelo, antes y después del tratamiento.

En el caso de los suelos del ex-Lago, el problema puede ser que a causa de los elevados contenidos de sodio, este se encuentre prácticamente saturado al complejo de intercambio y a la solución del suelo en las condiciones particulares del sistema y además precipitado en cantidades apreciables; esto último reportado por Becerra (1983). Se debe aclarar que las sales de sodio son muy solubles, pero para un sistema dado, el estado de saturación del suelo puede no ser humedad suficiente para solubilizar a todo el sodio presente.

El sodio es un elemento nocivo ya que da lugar a la salinización progresiva de los suelos de cultivo casi siempre debido a la utilización de aguas para riego con elevados contenidos de sodio. El exceso de sodio produce una acción dispersante, provocando la desintegración de la estructura del suelo. En la gráfica 8 se puede observar un cambio radical en las concentraciones de Sodio, la disminución considerable de este elemento es positiva ya que el Sodio es tóxico para el suelo y para las plantas y cultivos. *Mesembryanthenum crystallinum* L. disminuyo el exceso de sodio al sustituirlo por calcio.

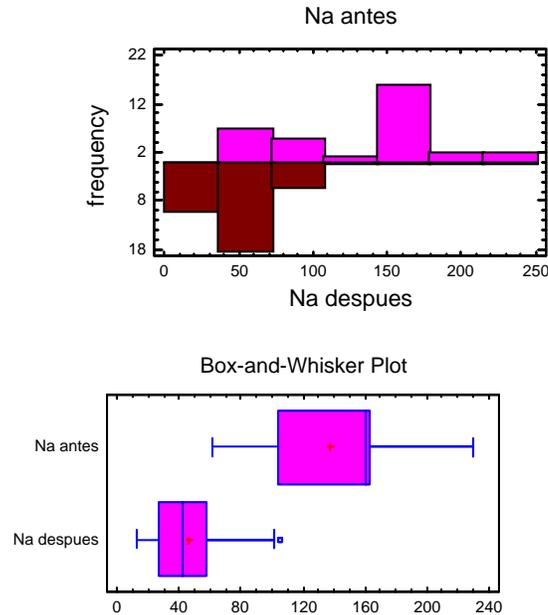


Los resultados del análisis de suelo realizado antes de transplantar indican que en promedio, la concentración de sodio es de 137.118 me/L., y la proporción de sodio en cuanto a los demás iones estudiados es de 73 %, siendo este el ion predominante.

Al concluir el tratamiento, los análisis de suelo para la etapa final, posterior a la cosecha de la planta, indicaron que hubo una reducción en las concentraciones de sodio de un 49 %. La reducción del sodio es atribuible básicamente al mecanismo de la planta. Sin embargo en los sitios donde hubo ausencia de la planta los niveles de sodio se mantuvieron igual que al inicio. Dicho efecto de disminución de sodio en el suelo por parte de la planta, se vuelve favorable a los cultivos.



Comparación estadística de sodio en suelo en dos tiempos

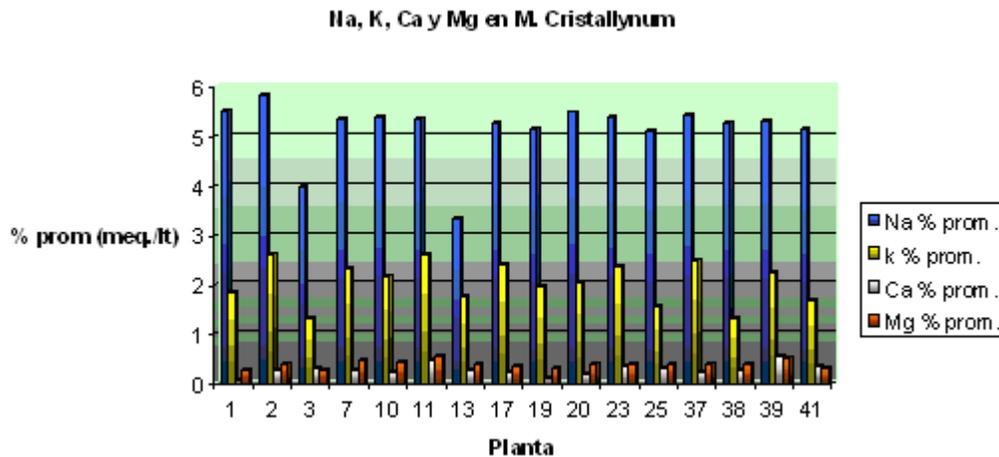


Así pues, al estar presente *Mesembryanthenum crystallinum* L. explica el hecho de que mejora las condiciones ambientales con la reducción del pH y C.E, al mismo tiempo de que la concentración de sodio disminuye. Esta disminución extrema es factor favorable para el desarrollo vegetal en estos suelos, además de disminuir la toxicidad para las plantas y tener una mayor disponibilidad de nutrientes.

Se puede decir que el sodio y potasio disminuyeron en gran proporción con el tratamiento, pues el porcentaje inicial era del 73 y 26 % respectivamente y al concluir con el tratamiento dichos porcentajes habían cambiado de manera significativa. De lo contrario, el calcio y magnesio tuvieron un incremento favorable por efecto del mecanismo de la planta. De manera que los resultados obtenidos indican cambios importantes y de gran ayuda para la recuperación del suelo, disminuyendo sales como el sodio que son nocivas y perjudiciales para el suelo.



Calcio, Magnesio, Sodio y Potasio en Plantas.

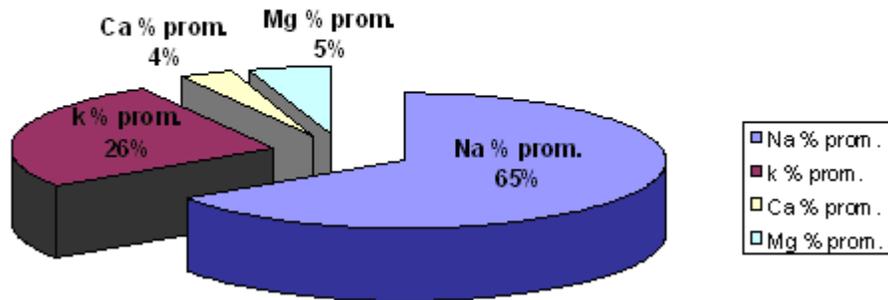


Graf. 9. Concentraciones de Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio, en *Mesembryanthemum crystallinum* L.

Como se puede observar en la gráfica 9. *Mesembryanthemum crystallinum* L. acumulo diferentes cantidades de los elementos estudiados en el suelo, principalmente Sodio, y en menor cantidad Calcio y Magnesio. Así mismo estas cantidades son un promedio del porcentaje de cada uno de los elementos extraídos por parte de *M. crystallinum*, lo cual indica que la planta se adapta a condiciones inhóspitas como es estrés salino, lo que para otras especies es un problema severo. Se debe considerar como parte primordial para la sobrevivencia de *M. crystallinum* a su mecanismo CAM, el cual juega un papel importante para el desarrollo y buen funcionamiento de la planta ante las altas concentraciones de sales; debido a la gran adaptación y al buen funcionamiento de la especie dentro de este tipo de suelos, es importante considerarla como una nueva alternativa para la restauración de suelos salinos.



% PROMEDIO DE ELEMENTOS



Graf. 10. Porcentaje promedio de los cuatro elementos absorbidos por *Mesembryanthemum crystallinum* L.

La gráfica 10 muestra que tan eficiente puede llegar hacer el mecanismo de la planta para extraer sales, se puede observar que el sodio es el elemento de mayor presencia dentro de *crystallinum*, lo cual es benéfico ya que si encontramos a este elemento en altas concentraciones en el suelo, es factor para impedir, el buen desarrollo de un cultivo. Posteriormente el elemento que asimilo la planta es el potasio con un 26%, contrariamente al calcio y magnesio, con un 4 y 5% respectivamente. Sin embargo estos dos últimos, no son tan notables dentro de la extracción de sales por parte de la planta, respecto a esto es bueno señalar que el calcio y magnesio, no son elementos tan perjudiciales para el suelo, ni para los cultivos, como el sodio, su presencia en concentraciones adecuadas no es nociva para el buen desarrollo de especies vegetales.



5.1 DISCUSIÓN GENERAL

Se sabe que *crystallinum* ha sido motivo de estudio debido a su componente de adaptación a condiciones de estrés salino, el cual ha sido descrito por Cushman y Bohnert (1997), Adams *et al.*, (1998) principalmente, quienes atribuyen como primordial mecanismo de adaptación por parte de la planta al CAM (ácido metabólico de las crasuláceas), el cual le da peculiar importancia y fuerte atracción hacia la investigación, en donde a pesar de la curiosidad por observar el crecimiento y desarrollo de esta planta en costas y lugares sumamente hostiles para otras especies, solamente se han realizado experimentos a nivel de invernadero, y a nivel bioquímico, lo cual ha hecho un mejor entendimiento y comprensión del mecanismo CAM.

De tal manera que en la zona del ex-Lago de Texcoco, que se caracteriza por un severo problema de salinidad y por un desperdicio de suelos que pudieran servir con fines agrícolas, *Mesembryanthemum crystallinum* L. como especie halófila, se ha visto que tiene la posibilidad de rescatar estos suelos, de una manera favorable, bajando el pH y la Conductividad Eléctrica de manera importante y significativa, siendo estos indicadores primordiales como respuesta al buen funcionamiento de la planta. También como se puede observar, *crystallinum* ha demostrado tener habilidad para la extracción de sales, esta habilidad es sumamente sobresaliente, ya que ayuda a la recuperación del suelo, evitando así, las elevadas concentraciones de iones tóxicos como el sodio, que son sumamente dañinos para los cultivos. En este caso este elemento (sodio) se presenta en el suelo del ex – Lago de Texcoco en un rango promedio de 137.1184 me / L. disminuyendo la concentración a 48.8993 me / L.

En este sentido Vera – Estrella, *et al.* (1999) trabajando con *crystallinum* obtuvieron resultados similares, esto bajo condiciones de invernadero, obteniendo efectos favorables, en donde se observaron cambios radicales en concentraciones de sodio de 0.3 a 0.05 mM.



La estimulación por la acumulación de sal en *Mesembryanthenum crystallinum* L., aumenta debido a la actividad de la V – ATPasa y la actividad hidrolítica, esto es relacionado con un aumento en la actividad vacuolar, sugiriendo que la combinación de estas dos actividades o medios de transporte, causan una acumulación de sodio en la vacuola de la planta (Barkla, *et al*, 1995).

El CAM ocurre en aproximadamente el 7% de las plantas vasculares (Cushman, 2001). Se piensa que las angiospermas terrestres CAM se diversificaron de forma polifilética a partir de ancestros C3 en algún punto durante el mioceno como una consecuencia de la disminución del CO₂ atmosférico (Raven y Spicer, 1996). Existe evidencia que indica que la dirección evolutiva ha sido de intermedios C3-CAM a CAM totales (revisado por Cushman, 2001), de manera paralela, por especialización y colonización de nuevos ecosistemas, progresivamente más áridos, llegando hasta la especiación (Bastide *et al*, 1993; Lüttge, 2002). El metabolismo CAM se encuentra en pteridófitos, gimnospermas y angiospermas, presentándose en este último grupo tanto en dicotiledóneas como en monocotiledóneas, abarcando 33 familias y 328 géneros (Winter y Smith, 1996).

La maquinaria bioquímica necesaria para CAM se encuentra presente en todas las plantas superiores, y está involucrada en un gran número de funciones metabólicas (Cushman, 2001).

A diferencia de las plantas C3 y C4, las plantas CAM, entre las que se encuentra *Mesembryanthenum crystallinum* L. asimilan CO₂ atmosférico en ácidos de cuatro carbonos, predominantemente de noche y subsecuentemente, lo fijan durante el siguiente día vía ciclo de Calvin. Los estomas de las plantas CAM permanecen abiertos durante la noche y cerrados durante la mayor parte del día, resultando de esta manera en una pérdida mínima de agua y fotorrespiración reducida (Herppich y Peckmann, 2000).



Por tanto, las plantas CAM exhiben tasas en la eficiencia del uso del agua cinco a diez veces más altas que las plantas C4, resultando en una considerable ventaja competitiva en ambientes en que el agua es el factor limitante, como por ejemplo desiertos o ambientes epífitos (Cushman, 2001). La adaptación CAM no solo es característica en *Mesembryanthemum crystallinum* L. también puede ser observada en ciertas plantas acuáticas que crecen en ambientes con baja concentración de CO₂ diurna. Además, las plantas CAM se distinguen aún más de las plantas C3 o C4 por un número considerable de características únicas (Cushman y Bohnert, 1997). Primero, las plantas CAM acumulan ácidos orgánicos en la vacuola durante la fase nocturna, predominantemente en forma de ácido málico, y sufren una recíproca acumulación de carbohidratos de reserva tales como almidón, glucanos o hexosas solubles durante la fase diurna. Segundo, para acomodar estos grandes cambios diurnos en ácidos de cuatro carbonos y carbohidratos, las plantas CAM exhiben grandes cantidades de PEPC para la fijación nocturna de CO₂ y poseen sistemas de enzimas decarboxilasas activas para poder proveer refijación diurna de CO₂ mediante el ciclo de Calvin. Tercero, la PEPC es activada de noche por fosforilación e inactivada de día por defosforilación, un patrón opuesto al encontrado en plantas C3 o C4. Además de estas características bioquímicas únicas, las plantas CAM han evolucionado en un sinnúmero de aspectos morfológicos y anatómicos dentro de los cuales se incluye, un mesófilo consistente en células con paredes celulares delgadas y vacuolas prominentes, variados grados de succulencia en hojas o tallos, estomas pequeños generalmente encriptados, cutículas gruesas y baja frecuencia de estomas que limitan la pérdida de agua (Sharkey, 1993).

Las plantas CAM usualmente poseen mesófilo no clorenquimatoso denominado hidrénquima, especializado en la acumulación de agua utilizada para la supervivencia durante largos períodos de sequía. Adicionalmente, el sistema radicular de las plantas CAM exhibe pequeñas proporciones raíz/ vástago que limitan la pérdida de agua hacia el suelo, aun así reteniendo la habilidad para la toma rápida de agua cuando están hidratadas (Gibson y Nobel, 1986). En este sentido, lo anterior nos hace entender del por que



Mesembryanthenum crystallinum L. se adaptó notablemente en el área del ex – Lago de Texcoco, ya que es una especie que no necesita de gran cantidad de agua para su supervivencia a diferencia de otras especies. Esta habilidad se vuelve una ventaja relevante por parte de *crystallinum* lo que probablemente sea un factor importante para que no exista competencia.

Al nivel más simple, CAM es un tipo de metabolismo en el que la actividad carboxilasa de tres carbonos (ribulosa-1,5-bifosfato carboxilasa/oxigenasa: Rubisco) y el de cuatro carbonos (fosfoenol piruvato carboxilasa) ocurren en una misma célula, con actividad enzimática separada temporalmente (Dodd *et al.*, 2002). Por esto, CAM requiere una regulación precisa en varios puntos específicos. Este metabolismo se encuentra sujeto a la creencia que todas las especies que exhiben CAM fijan CO₂ atmosférico exclusivamente de noche mientras los estomas permanecen abiertos. Aunque esto es cierto para algunas plantas, la flexibilidad del metabolismo, añadiendo la diversidad de especies CAM, asegura un patrón de respuestas mucho más amplio, que van desde extremos en los que no se fija CO₂ atmosférico en 24 horas, hasta la fijación continua de CO₂ durante el período de 24 h.

La definición de CAM, descrita por primera vez para la familia *Crassulaceae*, comprende que: 1) Poseen asimilación nocturna de CO₂ vía apertura estomática, fijación por PEPC y acumulación vacuolar del CO₂ a manera de ácidos orgánicos, predominantemente ácido málico (fase I). 2) Se presenta removilización diurna de los ácidos orgánicos almacenados en la vacuola, decarboxilación y refijación más asimilación de CO₂, tras cierre estomático en el ciclo de Calvin (fase III). Entre estas dos fases existen transiciones en las que los estomas permanecen abiertos para la toma de CO₂ por lapsos cortos durante el amanecer (fase II) y el atardecer, produciendo como consecuencia la fijación directa de CO₂ a carbohidratos cuando el acervo de ácido vacuolar se encuentra agotado (fase IV). Las fases II y IV responden de manera sensible a parámetros ambientales dominantes (Lüttge, 2004).



La flexibilidad en la expresión de estas fases es una característica general de la mayor parte de las plantas CAM. Este mecanismo está íntimamente ligado al medio ambiente, y puede ser modificado o perturbado por temperatura, intensidad lumínica, estatus nutricional, humedad ambiental relativa y disponibilidad de agua (Dodd *et al*, 2002). A nivel específico, las cuatro fases anteriormente mencionadas proveen un marco referencial conveniente para describir a CAM, pero se debe tener en cuenta que este esquema es probablemente el modelo ideal y en muchos casos no el real para dicho metabolismo.

Las especies C3-CAM son probablemente las de mayor flexibilidad en la expresión de CAM porque poseen una capacidad inherente de inducir CAM dependiendo de los factores medioambientales presentes (Dodd *et al*, 2002). En *Mesembryanthemum crystallinum* el cambio de C3 a CAM se observa cuando se induce estrés por déficit hídrico u osmótico (Adams *et al*, 1998). En general, la inducción de CAM es considerada como una respuesta al estrés que mantiene un balance positivo del carbono (Dodd *et al*, 2002).

CAM es una adaptación muy exitosa que permite a ciertas plantas habitar o competir en ambientes con limitaciones de agua o CO₂. Aspectos fisiológicos, anatómicos, taxonómicos, bioquímicos y evolutivos que han sido extensamente estudiados. Todo lo anterior respalda y demuestran que CAM y su inducción por algún tipo de estrés en el ambiente provee uno de los ejemplos más complejos e interesantes de rutas de regulación fisiológica y genética. Sin embargo, quedan grandes áreas sin resolver con respecto a CAM, por lo que en un futuro las investigaciones se deben dirigir hacia el desarrollar de programas en el área de bioquímica, fisiológica y genómica en modelos selectos de plantas CAM. Aunque el metabolismo ácido de las crasuláceas es una adaptación a la sequía por parte de especies vegetales terrestres, éste se manifiesta en un gran y diverso conjunto de especies y formas de vida, por lo que se debe tener en cuenta y estudiar más a fondo.



Estas aproximaciones proveerán una visión más integrada de las dinámicas de regulación implicadas en las respuestas a factores ambientales cambiantes observados en *Mesembryanthemum crystallinum* L., de tal manera que se vuelve una especie que contribuye prósperamente con el medio, además de inhibir otras sales como el potasio, eliminando los excesos de este elemento. De manera contraria pero benéfica contribuye con el aumento de elementos como el calcio y magnesio; considerando el aumento de las concentraciones de estos iones un buen aporte para el suelo. Por todos estos motivos la presencia de *Mesembryanthemum crystallinum* L. genera grandes beneficios para el suelo, además de tener una gran cualidad de ser resistente a condiciones difíciles como es la salinidad extrema. Se debe hacer notar que la planta tuvo el 53 % de éxito de sobrevivencia, por lo que solamente los cambios favorables se observaron en los sitios donde estuvo presente *Mesembryanthemum crystallinum* L. y en los sitios donde la especie no sobrevivió, los cambios fueron nulos, dejando en las mismas condiciones las características químicas iniciales del suelo.

Esto demuestra y respalda que esta especie se vuelve totalmente incomparable con otros tipos de restauradores, como los químicos y físicos, ya que si tomamos en cuenta las características del lugar como la falta de un drenaje adecuado, estos últimos se vuelven laboriosos, costosos y muchas veces inútiles u obsoletos, de forma que al demostrar que esta especie vegetal lleva a cabo grandes cambios a nivel químico en el suelo, es importante considerarla como elemento en la restauración de los suelos salinos. Sin embargo todavía faltan algunas características y funciones de la planta por estudiar, como la habilidad por tolerar el estrés salino y el mecanismo celular de *M. crystallinum*, razones que la hacen tan interesante y un importante punto de investigación (Cushman y Bohnert, 1995).



VI. CONCLUSIONES.

Mesembrianthemum crystallinum L. es una alternativa eficaz para el tratamiento contra la salinidad, particularmente en el suelo del área del Ex – lago de Texcoco, lo cuál también puede ser útil para producir un nuevo cultivo, con fines económicos, la cual es utilizada como: planta de ornato, alimento forrajero y para consumo humano, en países como Sudáfrica y de fitorremediación.

El tratamiento con *Mesembrianthemum crystallinum L.* en suelo, produce la reducción del pH y conductividad eléctrica. Estos 2 parámetros tuvieron un decremento significativo, por efecto de la incorporación de *Mesembrianthemum crystallinum L.*

Otro efecto significativo entre suelos (antes y después del tratamiento), radica principalmente en la disminución de Sodio. Aquellas muestras de suelo que bajaron en forma significativa su pH por el efecto de absorción de sales por parte de la planta, fueron las plantas que más incrementaron los niveles en Sodio.

Con la realización continua de proyectos donde se utilicen especies vegetales, se tendrán mejores resultados y de doble propósito con fines de recuperación de suelo y económica. Aunque el procedimiento, con respecto al tiempo es más lento, pero es un procedimiento biológico y natural.

Por ultimo se concluyo en la presente investigación, que es mejor hacer el trasplante de *Mesembrianthemum crystallinum L.* en la época de secas, dado que con las altas precipitaciones se produce una lixiviación de las sales del suelo, que podrían alterar y confundir los resultados del tratamiento con la planta.



VII. RECOMENDACIONES

La reditabilidad del proceso no se establece aquí, pero para ello se recomienda considerar el incremento en el valor del terreno por el grado de recuperación alcanzado, los años en que el suelo alcanzaría la recuperación total y la posibilidad de utilizar a futuro cultivos redituables y adaptables al área de estudio. No obstante, este somero análisis indica que:

- Es factible transformar estos suelos en terrenos agrícolas.
- Con el uso de *Mesembrianthemum crystallinum* L. se puede tener una producción considerable de alimento forrajero desde el primer año.
- El costo de todo el proceso puede recuperarse en poco tiempo.

Por lo tanto, con el apoyo institucional suficiente para contar con la infraestructura de riego y drenaje, y la reglamentación necesaria para que la superficie recuperada no se utilice para fines ajenos a la agricultura, es factible económicamente, recuperar los suelos del ex – Lago de Texcoco, y más aún considerando la necesidad imperante de incrementar la producción de alimentos.

En síntesis, el costo de recuperación se deberá principalmente a la construcción y cuidado de los sistemas de drenaje y riego, por otro lado el comportamiento de *Mesembrianthemum crystallinum* L. indica que su utilización si es conveniente.

Puesto que el trabajo de restauración del suelo se realizó con fines agronómicos, se recomienda en trabajos similares utilizar el desarrollo de algún cultivo posterior al tratamiento, como variable de respuesta principal.



Se recomienda desarrollar investigación en suelos similares a los del presente estudio con enfoque hacia la nutrición vegetal, para determinar posibles efectos de inhibición o toxicidad.

A pesar del avance enumerado y los resultados obtenidos en el conocimiento de la especie *Mesembrianthemum crystallinum L.* y su mecanismo de tolerancia a estrés salino, es un logro alcanzado, a lo que se refiere biorremediación y fitorremediación, aunque quedan aspectos importantes por considerar y estudiar en el futuro, como la regulación temporal y espacial del sistema descrito (*Mesembrianthemum crystallinum L.*), el efecto de la expresión como cultivo y el impacto en la productividad, principalmente. Sin embargo, la visión amplia y precisa que se tiene sobre el problema de salinidad en el área y los métodos actualmente disponibles para la profundización del estudio como fenómeno complejo, han cambiado las perspectivas y abren muchas más posibilidades para la mejora de la tolerancia de los cultivos a la salinidad.

Desde un punto de vista técnico, es posible recuperar para fines agrícolas los suelos del ex – Lago de Texcoco utilizando *Mesembrianthemum crystallinum L.* y un adecuado sistema de riego y drenaje.



VIII. BIBLIOGRAFÍA.

Aceves, L.A. 1996. Los terrenos ensalitrados y los métodos para su recuperación. Ediciones PATENA. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Aceves, N.E. 1999. El ensalitramiento de los suelos bajo riego. Identificación, control, combate y adaptación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

Adams P; Nelson DE; Yamada S; CHmara W; Jensen RG; Bohnert HJ, *et al.* 1998. Growth and Development of *Mesembryanthemum Crystallinum* (Aizoaceae). *New Phytol.* 138:171-190.

Amezcu-Romero J.C., Pantoja O. y Vera-Estrella R. 2005. La acuaporina McPIP2;1 DE *Mesembryanthemum crystallinum* Actúa como un canal de agua y se distribuye en compartimentos subcelulares en respuesta a la salinidad. Memorias del XIV Congreso de Bioenergética y Biomembranas. Sociedad Mexicana de Bioquímica A.C.

Anguiano, L.J. 1984. Evaluación de la metodología de diluciones sucesivas de aguas freáticas y aguas negras en los suelos salino – sódicos del ex – Lago de Texcoco. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo, México.

Ashraf, M. 1993. Effect of sodium chloride on water relations and some organic osmotica in arid zone plant species *Melilotus indica* (L.) All. *Tropenlandwirt*, 94: 95-102.

Barkla BJ; Zingarelli L; Blumwald E; Smith JAC. 1995. Tonoplast Na / H antiport activity and its energization by the vacuolar H / ATPase in the halophytic plant *Mesembryanthemum crystallinum*. *Plant Physiol*; 109: 549 – 556.



Bastide B; Sipes D; Hann J; Ting P. 1993. Effect of Severe Water Stress on Aspects of Crassulacean Acid Metabolism in Xerosicyos. *Plant Physiol*;103: 1089-1096.

Becerra, M.A. 1983. Uso del azufre para recuperar suelos salinos del ex – Lago de Texcoco. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.

Bohnert, H.J. y Cushman, J.C. (2000) la planta del hielo: Lecciones en tolerancia Abiotica de la tensión. *Diario de la regulación del crecimiento vegetal*. 19, 334-346.

Canberra, 2004. Plantas por un futuro - base de datos de la especie, 1997-2003; Herbarium nacional australiano.

Carvajal, M.; Martínez, V. y Alcaraz, C.F. 1999. Physiological function of water channels as affected by salinity in roots of paprika pepper. *Physiologia Plantarum*, 105: 95-101.

Chaney, R.L., Malik, M., Li, Y.M., Brown, S.L., Brewer, E.P., Angle, J.S., Baker, A.J.M. 1997. Phytoremediation of soil metals. *Curr. Opin. Biotechnol.* 8: 279-284.

Cunningham, S.D., Berti, W.R., Huang, J.W. 1995. Phytoremediation of contaminated soils and sediments. En: *Bioremediation: Science and Applications* (eds. Skipper, H.D. y Turco, R.F.), pp. 145-56, Soil Sci. Soc. Am., Madison.

Cushman J y Bohnert HJ. 1995. Transcriptional activation of CAM genes during development and enviromental stress. Springer - Verlag. Berlin.

Cushman J y Bohnert HJ. 1997. Molecular Genetics of Crassulacean Acid Metabolism. *Plant Physiol*;113:667-676.



Cushman J. 2001. Crassulacean Acid Metabolism. A Plastic Photosynthetic Adaptation to Arid Environments. *Plant Physiol*;127:1439-1448.

De la Peña, I. 1985. Metodología establecida para la determinación y solución de los problemas de drenaje en los distritos de riego de la República Mexicana. Mem. Tec. No. 341 de la SRH. México.

Dodd A; Borland A; Haslam R; Griffiths H; Maxwell K. 2002. Crassulacean Acid Metabolism: Plastic, Fantastic. *J Exp Bot*;53:559-580.

Ercolli E. y J. Gálvez 2001. Tratamiento biológico *ex situ* de residuos semisólidos de oleoductos. Laboratorio de Bioprocesos; Un. De Cuyo, Argentina.

Evans de C. M. 1978. Factores limitantes para la colonización vegetal del lecho del Ex – lago de Texcoco. Tesis de maestría. C. P. Chapingo, México.

Fernández, G.R. 1990. Algunas experiencias y proposiciones sobre recuperación de suelos con problemas de sales en México. *Terra* 8: 226-240.

Fisher, R.A. y Turner, N.C. 1978. Plant productivity in the arid and semiarid zones. *Annual Review of Plant Physiology*, 29: 277-317.

Gibson AC y Nobel PS. 1986. *The Cactus Primer*. Harvard University Press. England.

Grattan, S.R. y Grieve, C.M. 1994. Mineral nutrient acquisition and response by plants grown in saline environments. En: *Handbook of Plant and Crop Stress* (M. Pessarakli, ed) Marcel Dekker, Inc. New York, pp. 203-226.



Gutiérrez C; Ma del C. 1997. Los suelos de la ribera del ex – Lago de Texcoco. Macro y micromorfología. Tesis de Doctorado. Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Hartung, W.; Sauter, A. y Hose, E. 2002. Abscisic acid in the xylem: where does it comes from, where does it goes to ? *Journal of Experimental Botany*, 53: 27-32.

Hasegawa, P.M.; Bressan, R.A.; Zhu J.K. y Bohnert, H.J. 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 51: 463-499.

Herppich W, Peckmann K. 2000. Influence of Drought on Mitochondrial Activity, Photosynthesis, Nocturnal Acid Accumulation and Water Relations in the CAM Plants *Prenia sladeniana* (me-type) and *Crassula lycopodioides* (pepck-type). *Ann Bot*; 86:611-620.

Jackson, M.L. 1964. Análisis químico de suelos. Traducción al español por J. Beltrán M., Omega, Barcelona, España.

Jacobs, S.W.L. e Highet, J. (1990) *Aizoaceae*. flora (ed) de G.J. del volumen 1. pp 188-199. Prensa de la universidad de Nuevo Gales del Sur, Australia.

Jacoby, B. 1994. Mechanisms involved in salt tolerance in plants. En: *Handbook of Plant and Crop Stress* (M. Pessaraki, ed) Marcel Dekker, Inc. New York, pp. 97-123.

Leidi, E.O. y Saiz, J.F. 1994. Is salinity tolerance related to Na accumulation in Upland cotton (*Gossypium hirsutum*) seedlings? *Plant and Soil*, 190: 67-75.

Longstreth, D.J. y Nobel, P.S. 1979. Salinity effects on leaf anatomy. Consequences for photosynthesis. *Plant Physiology*, 63: 700-703.



Lüttge U. 2002. Co₂-Concentrating: Consequences in Crassulacean Acid Metabolism. *J Exp Bot*;53:2131-2142.

Lüttge U. 2004. Ecophysiology of Crassulacean Acid Metabolism. *Ann Bot*;93:629-652.

Maas, E. V. y Hoffman, G. J. 1977. Tolerancia de los cultivos a las sales. Mem. Tec. No. 372, SARH. México.

Maathuis, F.J.M. y Amtmann, A. 1999. K⁺ nutrition and Na⁺ toxicity: the basis of cellular K⁺/Na⁺ ratios. *Annals of Botany*, 84: 123-133.

Macías, R. J. C. 1982. Posibilidades de uso agropecuario de los terrenos del Ex – lago de Texcoco. Tesis profesional. ENA, Chapingo, México.

Maurel, C. y Chrispeels, M.J. 2001. Aquaporins. A molecular entry into plant water relations. *Plant Physiology*, 125: 135-138.

Maurel, C; Tacnet, F; Gùclù, J; Guern J. y Ripoche, P. 1997. Purified vesicles of tobacco cell vacuolar and plasma membranes exhibit dramatically different water permeability and water channel activity. *Proceedings National Academy of Sciences USA*, 94: 7103-7108.

Niu, X.; Bressan, R.A.; Hasegawa, P.M. y Pardo, J.M. 1995. Ion homeostasis in NaCl stress environments. *Plant Physiology*, 109: 735-742.

Ortega, E. H. M. 1976. Cambio físico – químico de suelos del vaso del ex – Lago de Texcoco, sujetos a lavado con diferentes diluciones. Tesis de maestría C. P; Chapingo, México.



Ortiz, O. M. 1990. Apuntes de la materia de Salinidad de suelos del Departamento de Suelos de la U. A. CH. Inédito.

Pearson, J.A. 1960. Tolerance of crops to exchangeable sodium. Agriculture Information Bulletin, No. 16.

Pizarro, F. 1978. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Ed. Agrícola Española, S.A. Madrid España.

Pizarro, F. 1885. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. 2º edición. Ed. Agrícola Española, S.A. Madrid, España.

Porta C; López – Acevedo R. Y Roquero De L. 1999. Edafología. Mundi – Prensa, Madrid, p. 454 – 457.

Raven J.A y Spicer R. 1996. The Evolution of Crassulacean Acid Metabolism. In: Winter K, Smith JAC, Editores. Crassulacean Acid Metabolism. Biochemistry Ecophysiology and Evolution. Berlin: Springer-Verlag. p. 360-385.

Reimann, C. y Breckle, S.W. 1995. Salt tolerance and ion relations of *Salsola kali* L.: differences between ssp. *tragus* (L.) Nyman and ssp. *ruthenica* (Iljin) Soo. The New Phytologist, 130: 37-45.

Richards, L.A. 1990. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. 6ª. Ed; pp. 154-160. Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América. Limusa, México, D.F.

Rock, S. y L. Jackson. 1997. Phytoremediation of organics Action Team. EPA 542 – F – 97 – 014. 1997.



Salt, D.E., Smith, R.D. y Raskin, I .1998. Phytoremediation. Annual Rev. Plant Physiol. *Plant Mol. Biol.* 49: 643-68.

Secretaria de Recursos Hidráulicos, 1981. Estudio Agrológico Especial del Ex – Lago de Texcoco, Edo. De México, Serie Estudios Publicación, Núm. 2 pp. 17 – 105.

Sharkey T. 1993. Fotosíntesis. En: Azcon-Bieto J, Talon YM. Fisiología y bioquímica vegetal. Editorial Macgraw-Hill; p. 81-85. España.

Tarín, V.M. y Velásquez, L.A. 1986. Lavado de suelos en el ex – Lago de Texcoco. Revista Ingeniería Hidráulica en México del mes de Agosto. Comisión del Lago de Texcoco, México. pp. 45-48.

Vásquez, R.P. y Salas, S.B. 1990. Análisis Freatimétricos en una red de 43 pozos de observación del ex – Lago de Texcoco, México. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo, México. pp. 36-42

Velásquez, L.A. y Luna, O. P. 1981. Estudio agrológico detallado del Ex – lago de Texcoco, Edo. De México. Comisión del Lago de Texcoco. SARH. pp. 107-111

Vera-Estrella Rosario, Bronwyn J. Barkla, Pantoja Omar y Bohnert J. Hans. 1999. Salt stress in *Mesembryanthemum crystallinum* L. cell suspensions activates adaptive mechanisms similar to those observed in the whole plant. *Planta*; 207: 426 – 435.

Winter K y Smith J. 1996. AC, Editores. Crassulacean Acid Metabolism. Biochemistry Ecophysiology and Evolution. Berlin: Springer-Verlag. p. 360-385.

Wynjones, R.G. y Gorham, J. 1983 . Osmoregulation. En: Encyclopedia of Plant Physiology, vol. 12C. Physiological Plant Ecology III (O.L. Lange, P.S. Nobel, C.B. Osmond, H. Ziegler, eds) Springer-Verlag, Berlin, pp. 35-58.



Yadav, J. S. P. 1981. Reclamation and crop production in álcali solils. *Current Science* 50 (9): 387 –393.

Yaron, B; Danfors, E y Vaadia, Y. 1973. *Arid zone irrigation* Springer – Verlag New York. P. 189 – 199, 263 – 276.

Zhu J. K. 2001. Plant salt tolerance. *Trends Plant Sci* 6: 66-71.