



Universidad Veracruzana

# UNIVERSIDAD VERACRUZANA

FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y

AGROPECUARIAS

Campus-Tuxpan

---

---

Maestría en Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros

**Potencial hídrico en *Avicennia germinans* (L.) L en sitios estables y deteriorados de la zona de Reserva Ecológica de la CTPALM, Tuxpan, Veracruz, México**

## TESIS

Que para obtener el título de:

**MAESTRA EN MANEJO DE ECOSISTEMAS MARINOS Y COSTEROS**

PRESENTA:

**Biol. Olga Bartolo Mateos**

Director:

**M.A. Agustín de Jesús Basáñez Muñoz**

Director Externo:

**Dr. Jorge A. López-Portillo Guzmán**

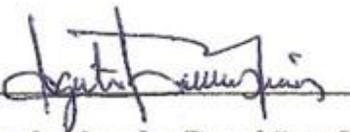
Tuxpan, Veracruz

Enero 2015

Tuxpan de Rodríguez Cano Veracruz, a Diciembre del 2014

La presente Tesis titulada "**Potencial hídrico en *Avicennia germinans* (L.) L en sitios estables y deteriorados de la zona de Reserva Ecológica de la CTPALM, Tuxpan, Veracruz, México**" realizada por la C. Biól. Olga Bartolo Mateos, bajo la dirección particular del Mtro. Agustín de Jesús Basáñez Muñoz y con la codirección del Dr. Jorge López Portillo Guzmán ha sido aprobada y aceptada para poder llevar a cabo la solicitud de fecha de examen para obtener el grado de:

**MAESTRA EN MANEJO DE ECOSISTEMAS MARINOS Y COSTEROS**



**Mtro. Agustín de Jesús Basáñez Muñoz**

**DIRECTOR**



---

**Dr. Jorge López Portillo Guzmán**

**CODIRECTOR**

La presente Tesis titulada "**Potencial hídrico en *Avicennia germinans (L.) L* en sitios estables y deteriorados de la zona de Reserva Ecológica de la CTPALM, Tuxpan, Veracruz, México**" realizada por la C. Biol. Olga Bartolo Mateos, ha sido aprobada y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN MANEJO DE ECOSISTEMAS MARINOS Y COSTEROS**

**COMISION LECTORA**



---

**Dr. Ascención Gapiestrán Barradas**

**LECTOR**



---

**Mtra. Lilitiana Cuervo López**

**LECTOR**



---

**Mtra. Sauw Rah'ee Velazquez Jiménez**

**LECTOR**

**Tuxpan de Rodríguez Cano, Veracruz, Diciembre del 2014**

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Jorge López Portillo por todo el apoyo otorgado para la realización de esta tesis, por haber depositado su confianza en mí en estos años de trabajo en el manglar, su dedicación, tiempo y paciencia para conmigo. Gracias por todo y que Dios lo bendiga siempre

Al Mtro. Agustín de Jesús Basáñez Muñoz por el asesoramiento y apoyo brindado desde mis inicios en la carrera de Biología con los proyectos de investigación en diferentes temáticas del manglar, por su confianza depositada en mí para sacar adelante estos trabajos que finalmente culminaron en tesis. Gracias Biol. Basáñez

A los miembros que integran la comisión revisora: Mtra. Liliana Cuervo López por sus atinadas correcciones que finalmente dieron forma a esta tesis por su interés y tiempo dedicado durante la revisión del mismo. Al Dr. Ascensión Capistrán Barradas por sus observaciones y consejos sobre lo que era necesario para mi trabajo. Mtra. Sauw Rah'ee Velázquez Jiménez por su confianza y apoyo otorgado durante la maestría y ser parte de mi comisión lectora

A todos los catedráticos que formaron parte en transmitirme y compartir sus experiencias y conocimientos durante la realización de la Maestría de Ecosistemas Marinos y Costeros, Gracias

A la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para realizar los estudios de Maestría en Manejo de Ecosistemas Marinos y Costeros

Al Ing. Guillermo Castillo por brindarme el equipo necesario para campo y otorgarme el permiso de realizar los muestreos en la Zona de Reserva Ecológica de la Central Termoeléctrica "Presidente Adolfo López Mateos"

A la Dra. Ana Laura, Dr. Lalo, Víctor Vásquez por sus pláticas y consejos en las salidas al campo y cada momento que lo ameritaba

Al sobrino del Dr. Jorge quien vino aventurarse en el manglar de Tuxpan y brindo todo su apoyo para el manejo de los cilindros de nitrógeno durante esas noches de desvelo y poder procesar las ramas de los árboles. Muchísimas gracias

A Isis por su apoyo en el procesamiento de algunas muestras que fueron llevadas al laboratorio de la Red de Ecología Funcional para completar mis datos de campo.

## DEDICATORIAS

A Dios y a la Virgen de Guadalupe por sus bendiciones, por cuidarme y protegerme a donde quiera que haya andado, por esa fe y esperanza que nunca se apagó, siempre estuvieron latentes en mi corazón y hoy es el principio de una realidad

A mi mama Anastasia Mateos Humos (+) quien siempre creyó en mí, fue mi cómplice y estaba pendiente siempre de mi regreso en cada salida al manglar. El señor la llamo y se tuvo que adelantar, pero lo mejor de todo es que ya goza de un lugar de luz (sé que desde ese lugar me sigues dando tu bendición ma`)

A mis amigas y comita's Yeny, Kby, Mary, Idalis, Tomy, Dulce quienes la mayoría de ellas durante nuestra formación profesional también se aventuraron y recorrían conmigo el manglar, por todo su ánimo, amistad y por estar siempre ahí cuando más se necesita

A Moy quien siempre estuvo disponible para acompañarme al manglar y Mauricio que también forma parte de esto. Muchísimas gracias

A los amigos que encontré en la maestría Biol. Vicencio, Biol. Rosina, Biol. Conchita gracias por su compañerismo y amistad cada vez que uno lo necesitaba

Al pilar de la Fam. Sánchez Silva, doña Piedad, doña Bety quienes me brindaron su amistad, me dieron su confianza, consejos y apoyo

A Guita, por recibirme siempre en su casa, su confianza, cariño y por todas sus atenciones siempre para conmigo

A mis hermanas y sobrinos por darme siempre su apoyo en todo y porque sé que esto es solo un ejemplo para ellos que si se puede y también pueden lograr todo lo que se propongan para bien de cada uno de ellos

A mi esposo Servando por su apoyo incondicional, paciencia y darme ánimo de poder culminar este trabajo (Dios nunca equivoca y te puso en mi camino para no caminar sola).

ÍNDICE	Pág.
<b>RESUMEN</b>	
I.- INTRODUCCIÓN.....	1
II.- ANTECEDENTES.....	3
Hipótesis de Trabajo.....	9
III.- OBJETIVOS.....	10
IV.- ÁREA DE ESTUDIO.....	11
V.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
VI.- RESULTADOS.....	21
6.1 Nivel de Inundación.....	22
6.2 Salinidad.....	23
6.3 Gradiente raíz-suelo-planta de potencial hídrico.....	26
6.4 Comparación entre sitios estables y deteriorados.....	28
6.5 Estimación de daño en árboles de <i>Avicennia germinans</i> .....	32
VII DISCUSIÓN.....	33
VIII CONCLUSIONES.....	35
IX APLICACIÓN PRÁCTICA DEL TRABAJO.....	37
X BIBLIOGRAFÍA.....	38

	<b>Pág.</b>
1.- Gradiente hipotético de potencial hídrico desde suelo hasta la copa	9
2.- Localización general del área de estudio y ubicación de la zona de reserva ecológica perteneciente a la Central Termoeléctrica Presidente Adolfo López Mateos (CTPALM)	12
3.- Zona de reserva ecológica de la CTPALM	13
4.- Toma de muestras para medir salinidad del agua intersticial	15
5.- Preparación de las muestras de suelo	16
6.- Marcaje de los árboles con placas de aluminio	17
7.- Procesamiento de las ramas de <i>A. germinans</i> para medir el potencial hídrico	18
8.- Seis etapas de daño de árboles de <i>A. germinans</i>	20
9.- Nivel de inundación en el sitio deteriorado y sitio estable	22
10.- Salinidad superficial e intersticial en el sitio deteriorado ubicado en el terraplén central y en el sitio estable ubicado en el terraplén sur	25
11.- Comparación de potencial hídrico en las épocas de secas, lluvias y nortes de 2011 y 2013	30
12.- Comparación de la hipótesis de trabajo con el gradiente de potencial hídrico medido desde el suelo hasta la copa del árbol	31
13.- Puntaje de daño estimado entre sitios dañados y estables	32

# Potencial hídrico en *Avicennia germinans* (L.) L en sitios estables y deteriorados de la zona de Reserva Ecológica de la CTPALM, Tuxpan, Veracruz, México

Olga Bartolo Mateos

## RESUMEN

Los manglares crecen en zonas costeras intertropicales bajo la influencia de las mareas. Un aumento en la salinidad equivale a una sequía fisiológica que se acentúa si la disponibilidad de agua en el suelo disminuye durante la época de secas, lo cual las plantas deben generar, a través de la transpiración, un potencial hídrico más negativo que el suelo para que el agua fluya bajo tensión de las raíces hacia la copa para realizar fotosíntesis y crecer. En el manglar de la zona de reserva ecológica de la CTPALM de Tuxpan, Veracruz, dentro del sitio Ramsar 1602, hay zonas con mortalidad masiva, deterioradas o en buen estado de conservación como resultado del bloqueo de flujo hidrológico por la construcción de tres terraplenes entre los años de 1987 y 1989 que causó una acumulación crónica de sales en los suelos. Se compararon los gradientes de potencial hídrico desde el suelo hasta la copa en árboles de *Avicennia germinans* en zonas estables y deterioradas. El nivel de inundación y la salinidad se midieron mensualmente, y el potencial hídrico se midió en los años de 2011 y 2013 en meses representativos de las épocas de secas, lluvias y nortes (mayo, septiembre y enero, respectivamente). Los resultados indican que no hubo diferencias significativas en los potenciales hídricos entre sitios en las épocas de secas y de nortes, pero sí en la época de lluvias. Dichas diferencias, que son hasta de 2 MPa entre las ramas altas de zonas deterioradas y en buen estado de conservación son la diferencia entre la vida y la muerte, lo que se pudo constatar en árboles marcados para seguir su supervivencia. En conclusión, aunque los valores de salinidad más altos se registraron en secas, el daño en los mangles en zonas deterioradas es más severo en la época de lluvias, cuando deben incrementar la fotosíntesis y la productividad. Aunque la salinidad ha disminuido tras la apertura de canales en los terraplenes, el proceso de lavado de sales y recuperación del daño crónico aún debe ser superado por los mangles. En términos prácticos, las plántulas deberán tener potenciales hídricos mucho más negativos que el potencial hídrico del suelo en donde sean transplantadas.

**Palabras clave:** *Avicennia germinans*, estrés hídrico, hipersalinidad, gradientes de potencial hídrico, inundación, mortalidad masiva, potencial hídrico.

## I. INTRODUCCIÓN

Los bosques de manglar crecen en los litorales protegidos de las zonas costeras ecuatoriales tropicales y subtropicales expuestos al flujo de marea, alrededor de esteros y lagunas costeras, y cerca de las desembocaduras de ríos y arroyos (Kathiresan y Bingham 2001; Conabio, 2008). Un aspecto importante de los manglares es su fisonomía, que está definida por la altura, el diámetro y la altura de la primera ramificación de los árboles dominantes.

Es común describir la estructura y composición de las comunidades de manglar en función de variables ambientales como salinidad, temperatura, pH y redox del agua intersticial, así como textura y composición del sustrato (Twilley *et al.*, 2009), pero la fisonomía está determinada principalmente por su respuesta a gradientes salinidad en un contexto de cambios en el patrón de inundación (o hidropereodo) provocados por aportes fluviales estacionales, escurrimientos terrestres, precipitación, variaciones en el nivel de marea, y la altura del suelo en donde están los individuos con respecto al nivel del mar (López-Portillo y Ezcurra, 1989; Tovilla *et al.*, 2002; Conabio, 2008).

Un nuevo régimen de salinidad e inundación puede provocar la muerte parcial o total de las plantas, ocasionado ahogamiento o estrés por sequía o salinidad, lo que dependerá de la época del año. La respuesta de las plantas a los cambios ambientales puede resultar en un daño crónico, que se refleja en algunos

fragmentos con diferentes grados de afectación en la comunidad y que pueden agudizarse en función del tiempo de exposición a las nuevas condiciones ambientales (Boa, 2008). En la zona de Reserva Ecológica de la Central Termoeléctrica Presidente Adolfo López Mateos (CTPALM) ubicada en el km 8 de la Playa Norte de Tuxpan, Veracruz, se presentan fragmentos con mortalidad o deteriorados de manglar y zonas estables en buen estado de conservación, que se pueden observar en las imágenes de satélite disponibles en *Google Earth*.

La salinidad del manglar varía localmente y su efecto sobre las plantas puede medirse con variables que pueden considerarse como indicadores de tensión ambiental, como el potencial hídrico (una medida del estado de energía del agua que determina su dirección de flujo; Taiz y Zeiger, 2002) y, fisiológicamente, con la definición de los síntomas que pueden caracterizarse en categorías crecientes de daño en el árbol y en la comunidad de estudio (Bartolo Mateos, 2010). El estudio propuesto tiene importancia práctica, pues la detección de valores críticos de potencial hídrico puede servir como indicador de alerta temprana para resolver problemas de mortalidad en manglares y además sugiere estrategias previas de aclimatación para tener mayor probabilidad de éxito en la reforestación con manglares.

## II. ANTECEDENTES

Los manglares se desarrollan en zonas costeras tropicales, caracterizadas por temperatura, humedad y radiación solar elevadas, así como un ambiente salino y frecuentemente inundado. Los manglares responden al patrón de inundación que resulta de la combinación de aportes fluviales, escurrimientos terrestres, precipitación, evaporación. La estructura, composición y fisonomía de los manglares están asociadas al ambiente geomorfológico, al nivel topográfico óptimo y a la salinidad del agua, temperatura y composición del sustrato (Agraz-Hernández *et al.*, 2006). Debido a estas condiciones las plantas de manglar cuentan con mecanismos para la regulación de sales, como la exclusión, en la cual las raíces de la planta evitan la entrada de sales, la ultrafiltración, que es un mecanismo de absorción selectiva; y la excreción, que es cuando las sales que están dentro de la planta son eliminadas por glándulas foliares especializadas (Scholander *et al.*, 1962; Scholander, 1968). Cuando aumenta la salinidad disminuye la disponibilidad de agua en el suelo, ante lo cual la planta reacciona generando potenciales hídricos ( $\psi$ ) más negativos para extraer agua y reduciendo su conductancia estomática (Naidoo, 1984,1985; Ball, 1996).

El agua requerida por las plantas se obtiene principalmente de la disponible en el suelo, donde también se encuentran los iones indispensables para el crecimiento vegetal. En los suelos que no son salinos, la concentración de iones es muy pequeña y sus potenciales hídricos están muy cercanos a cero. Dichos

potenciales pueden ser más negativos a medida que el suelo va perdiendo agua disponible. Para que las plantas puedan extraer agua del suelo necesita generar potenciales hídricos más negativos. Esto no se puede lograr por bombeo. (Esto es, mediante el uso de energía), como sucede por la acción humana para subir agua desde un depósito hasta la azotea de un edificio, sino que se logra a través de un efecto de succión por transpiración mediante el mecanismo explicado por (Taiz y Zeiger, 2002) conocido la teoría de la *cohesion-tensión del ascenso de savia*. Este mecanismo permite que cualquier planta pueda tomar agua del sustrato si es capaz de generar tensiones mayores que las que tiene dicho sustrato (López Portillo *et al*, 2014).

Por ejemplo, los árboles más altos del mundo, las secuoyas de California en Estados Unidos (*Sequoia sempervirens*) y el eucalipto Real (*Eucalyptus regnans*) de Australia, pueden alcanzar hasta 100 m de altura. Si consideramos el tallo como un gran tubo podemos estimar que la diferencia de presión necesaria para vencer la fricción del agua en movimiento ( $0.02 \text{ MPa m}^{-1}$ ) debe ser  $0.02 \times 100 = 2 \text{ MPa}$ . Además de la fricción debe considerarse el peso de la columna de agua por el efecto de la gravedad equivaldría a  $0.01 \text{ MPa m}^{-1} \times 100 \text{ m} = 1 \text{ MPa}$ . Por lo tanto, la diferencia de presión que el agua debe vencer para pasar del nivel del suelo a la copa de un árbol de 100 metros debe ser al menos de 3 MPa (Taiz y Zeiger, 2002). Esto es logrado por la planta utilizando un mecanismo que involucra la transpiración, vasos o traqueidas muy delgadas en el xilema y la capacidad del agua para formar puentes de hidrógeno. La planta genera una alta tensión en su

copa por la transpiración y el agua es succionada del suelo y transportada a través del xilema hasta llegar a las hojas. Scholander *et al.* (1965) compararon los potenciales hídricos entre especies y entre alturas en una misma especie. Encontraron que los potenciales hídricos eran de alrededor de -6 a -2.7 en halófitas costeras (incluye los mangles *Avicennia germinans* y *Rhizophora mangle*, con potenciales hídricos de -5.5 MPa, pero el arbusto *Batis maritima* alcanzó -6 MPa); de -8 a -1 en plantas de desierto (la gobernadora, *Larrea tridentata* tiene el potencial hídrico más negativo); de -2.5 a -0.2 en especies de bosque (con el Abeto de Douglas, *Pseudotsuga menziesii* con el potencial hídrico más negativo); y de -1.8 a -.2 MPa en los humedales de agua dulce, entre ellos una especie de sauce. De esta forma, puede notarse que los potenciales hídricos de los manglares están entre los más negativos del reino vegetal, sólo comparables a los potenciales hídricos de plantas de desierto que pueden tolerar condiciones extremas de sequía.

Por otra parte, Scholander *et al.* (1965) reportaron que los potenciales hídricos de ramas de diferentes alturas en el abeto de Douglas y la secuoya disminuían conforme aumentaba la altura: en el abeto, los potenciales hídricos en ramas altas fueron de -1.7 y -2.3 MPa a 30 y 79 metros de altura mientras que en la secuoya los potenciales hídricos fueron de -0.8 y -1.7 MPa a 15 y 82 metros, respectivamente. Estos valores son ligeramente mayores a los mencionados previamente (Taiz y Zeiger 2002), pero los valores están cercanos.

Otro factor importante en las condiciones ambientales en las que se desarrollan los manglares es el nivel de agua, ya que la concentración de oxígeno disminuye en los suelos inundados, afectando proceso de respiración aeróbica y la capacidad para tomar nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, que deben tomarse en forma oxidada (Ball, 1996; Lambers *et al.*, 2008). El agua entra a la planta mediante un mecanismo que aprovecha la transpiración de las hojas y la propiedad del agua de formar puentes de hidrógeno, lo que le permite fluir dentro del tejido de conducción de savia bruta de la planta (xilema) bajo fuertes tensiones a favor de un gradiente de potencial hídrico (Taiz y Zeiger, 2002; Kim *et al.*, 2014). El potencial hídrico está constituido por tres componentes: el potencial de presión (generado por la diferencia de presión entre el suelo y las hojas), el potencial osmótico (generado por la concentración de solutos) y el potencial gravitatorio, que disminuye en una atmósfera de presión (aproximadamente un bar o 0.1 MPa) por cada 10 metros de altura (Hellkvist *et al.*, 1974).

Algunos procesos fisiológicos, como la transpiración, se realizan fundamentalmente en las hojas, lo que optimiza el uso del agua que fluye por la planta en función de la disponibilidad de ésta misma y de los nutrientes disponibles, así como de la temperatura, luz e insolación, entre otras variables ambientales (Kozlowski *et al.* 1997; Montes Cartas, 2002). Las características morfológicas de las hojas se modifican de acuerdo a la salinidad del medio y el área foliar disminuye al incrementarse la salinidad y disminuir la precipitación pluvial anual (Ball *et al.*, 1995; Medina *et al.*, 1995; Rico Gray y Palacios-Ríos,

1996). Con la transpiración, el potencial hídrico disminuye, volviéndose más negativo conforme el agua pasa del suelo hacia las hojas y hasta la atmósfera. La velocidad del flujo de agua dentro de la planta depende de qué tan grande es la diferencia de potencial entre el suelo y la planta (Nobel, 2005). A esta diferencia contribuye el potencial osmótico de la savia del xilema, que tiende a aumentar hacia el mediodía (López-Portillo *et al.*, 2005; 2014) y el potencial osmótico de la concentración salina del suelo (Méndez Alonzo *et al.*, 2012).

En el manglar de la reserva de la Central Termoeléctrica “Presidente Adolfo López Mateos” (CTPALM) pueden distinguirse zonas en donde la mortalidad de árboles es masiva, pasando por aquellas con mortalidad parcial o deterioradas hasta las zonas de mortalidad muy baja o inexistente, las que pueden considerarse como en buen estado de conservación. También se observa que la mortalidad de cada árbol no es instantánea, sino que sigue un patrón característico: primero se mueren las ramas más altas y después las más bajas, hasta que finalmente muere el individuo completo (Bartolo Mateos, 2010).

Este patrón de mortalidad se ha reportado para árboles que están sujetos a sequía, que es claramente una tensión hídrica, esto se ha explorado en los chaparrales de California en EUA, en donde se encontró que las ramas más altas morían cuando estaban sujetas a sequías extensas (Rood *et al.*, 2000). Lo que Rood *et al.*, (2000) y Davis *et al.*, (2002) demostraron es que la sequía provocaba embolismos en el xilema de los arbustos y que las ramas que sufrían más eran las

de mayor altura. Sin embargo, no hay reportes sobre la fisiología y mortalidad de plantas en zonas constantemente inundadas, como es el caso de los manglares, en donde el factor que genera la tensión ambiental probablemente se relaciona con una alta salinidad (Elster, 2000). Para explicar este patrón de mortalidad es necesario analizar el gradiente de potencial hídrico en una planta, que abarca desde el agua disponible en el suelo hasta las ramas terminales más altas.

En este sentido, *A. germinans* es un sujeto de estudio ideal, ya que cuenta con pneumatóforos (Tomlinson 1986) para obtener mediciones de potencial hídrico de las raíces y así comparar los potenciales hídricos del suelo, las raíces, las ramas bajas y las ramas altas. El agua fluye a favor del gradiente de potencial hídrico, de potenciales hídricos menos negativos a potenciales hídricos más negativos. En el mangle negro *A. germinans* pueden colectarse los pneumatóforos para estimar el potencial hídrico a nivel de raíces. Esta es una ventaja en relación con otros árboles y permite un mejor conocimiento del gradiente de potencial hídrico.

El conocimiento generado permitirá calcular el valor crítico de potencial hídrico al que las ramas empiezan a morir, lo que se ha realizado en muy pocas especies (Davis *et al.*, 2002) y en ninguna especie de mangle. El estudio propuesto tiene importancia práctica, pues la detección de valores críticos de potencial hídrico puede servir como un sistema de alerta temprana para resolver problemas de mortalidad en manglares y además sugiere estrategias previas a la reforestación de manglares para que ésta sea más exitosa.

## HIPÓTESIS

El gradiente de potencial hídrico se observará tanto en árboles en buen estado como en árboles deteriorados, pero los valores de potencial hídrico serán significativamente menores en los árboles de sitios deteriorados que en los árboles de sitios conservados. Además, los potenciales hídricos serán significativamente menores en las ramas altas de los árboles deteriorados que en las ramas altas de los árboles conservados (Figura 1).

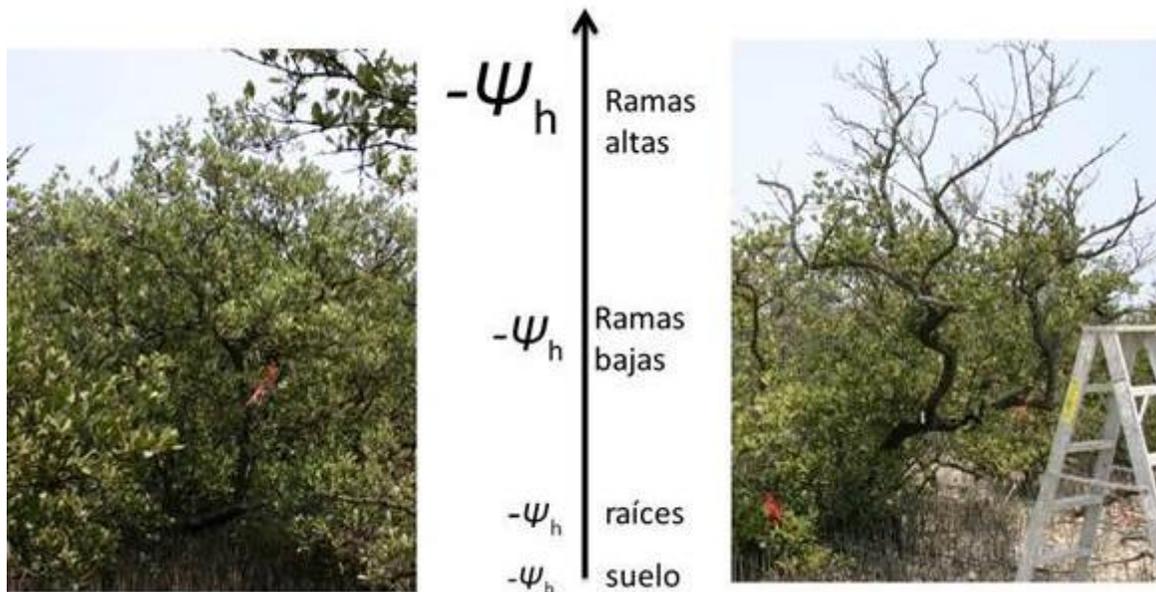


Figura 1. Hipótesis de trabajo en donde se indica que el potencial hídrico disminuye (es más negativo) desde el suelo hasta las ramas más altas de la copa en las plantas, lo que puede explicar por qué en zonas en donde ha aumentado la salinidad por la perturbación del flujo de agua mueren primero las ramas más altas. Foto izquierda, árbol de mangle conservado; foto derecha, árbol de mangle deteriorado

### III. OBJETIVOS

#### 3.1 OBJETIVO GENERAL

Estimar los valores críticos del potencial hídrico del suelo a la copa en árboles de *A. germinans* ubicados en zonas estables y deterioradas

#### 3.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Registrar la salinidad y nivel de inundación en los periodos de sequía lluvia y nortes y relacionarlos con el potencial hídrico de los árboles en zonas estables deterioradas
- Calcular el gradiente hídrico en mangle de *Avicennia germinans* en zonas deteriorados y estables para estimar los valores críticos a partir de los que se desencadena la mortalidad de los individuos.
- Dar seguimiento a la supervivencia de árboles en las zonas deterioradas y en zonas estables en periodos representativos de las épocas de sequía, lluvias y nortes.

## IV. ÁREA DE ESTUDIO

### Localización Geográfica del Área de Estudio

Los manglares de la laguna de Tampamachoco están asociados a los cuerpos de agua del Río Tuxpan o Pantepec. Limita al este con el sistema de dunas costeras de Tuxpan, al sur con el cerro de Tumilco, al oeste con lomeríos muy bajos y planicies pluviales más elevadas y al norte con el estero de Majahual.

La Laguna de Tampamachoco y el estero Tumilco conforman el sitio Ramsar 1602 Manglares y humedales de Tuxpan, ubicado a 15 km del Área de Protección de Flora y Fauna Arrecifal Lobos-Tuxpan sobre la que tiene influencia directa la corriente del río Tuxpan. Predomina el clima Aw<sub>2</sub>, o cálido subhúmedo con una temperatura media anual mayor de 22 °C. La precipitación del mes más seco oscila entre 0 y 60 mm; lluvias de verano con índice de P/T mayor de 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2 % del total anual (López Portillo *et al.*, 2011).

Respecto a las épocas del año la época de secas comprende los meses de Febrero a Abril, el periodo de lluvias es muy marcado en el mes de Septiembre, los nortes ocurren preferentemente de Octubre a Mayo, se pueden presentar vientos de hasta 110 km/h, descenso en la temperatura desde 2 a 15° en 24 horas (López Portillo *et al.*, 2012).

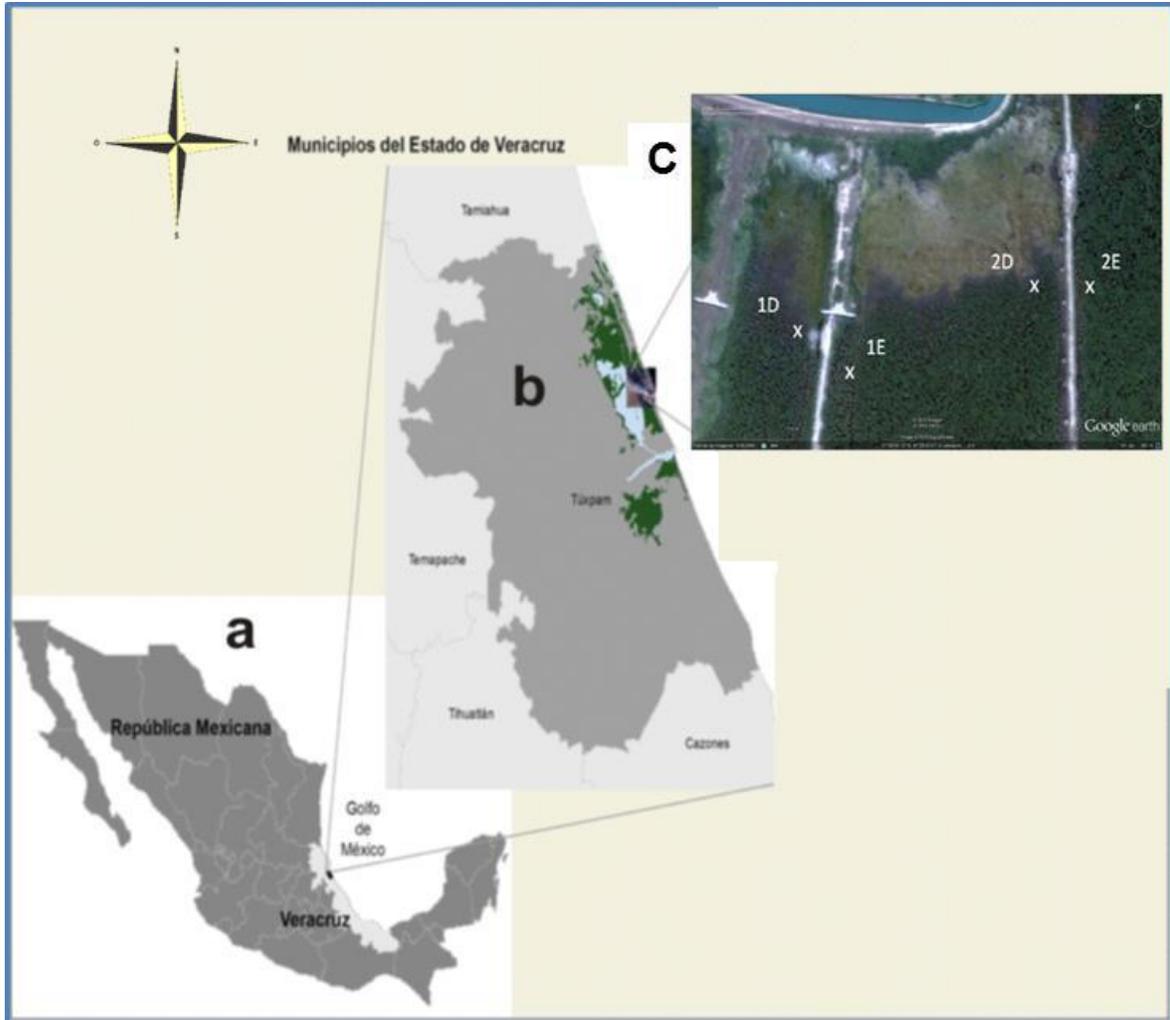


Figura 2.- Localización general del área de estudio y ubicación de la zona de reserva ecológica perteneciente a la Central Termoeléctrica Presidente “Adolfo López Mateos (CTPALM), asociado a la Laguna de Tampamachoco (modificado de Bartolo Mateos 2010 de una imagen del INECOL).

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó tomando en cuenta cuatro sitios que fueron considerados en un trabajo anterior (Bartolo Mateos, 2010). Se seleccionaron dos sitios deteriorados y dos sitios en buen estado de conservación. Los sitios estable y deteriorado fueron pareados, con un par cercano al terraplén central y otro par cercano al terraplén sur para fines de comparación estadística (Fig. 3). Este tipo de muestreo es independiente del área porque se basa en el número de individuos seleccionados, pero la superficie cubierta en cada sitio, tomando en cuenta el área cubierta por los árboles seleccionados, fue de alrededor de 200 m<sup>2</sup>.

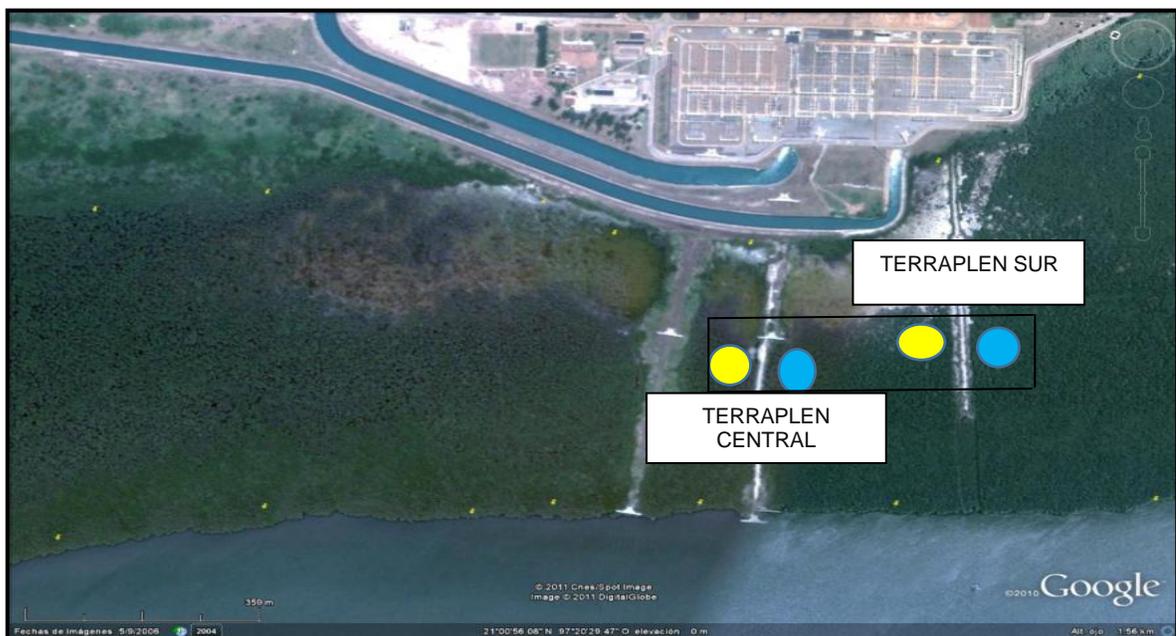


Figura 3.- Zona de reserva ecológica de la “Central Termoeléctrica Adolfo López Mateos”. En círculos amarillos se ubican las zonas de muestreo con árboles dañados y en círculo azul las zonas con árboles estables.

### **Nivel de inundación**

El nivel de inundación (Figura 4c) se midió mensualmente durante un año en los dos sitios estables y los dos sitios dañados del terraplén central y terraplén sur, utilizando una regla de plástico de 30 cm, colocándola en la base del suelo para posteriormente tomar lectura del nivel del agua superficial. También se colocaron piezómetros de 1.5 m de profundidad y 1 m de altura en cada sitio para poder medir la profundidad del manto freático y para medir la salinidad de éste, pues en el año de muestreo, durante la época de secas, el nivel de inundación fue inexistente. Para analizar la variación de la salinidad y nivel de inundación en función del tiempo, así como el potencial hídrico, se realizaron análisis de varianzas anidados (Zar, 1999).

### **Salinidad**

La salinidad se midió mensualmente durante un año en los sitios estables y deteriorados del terraplén central y terraplén sur. Para medir la salinidad superficial cuando no había agua de inundación se extrajo una muestra de suelo con la ayuda de una jeringa de plástico capada (Figura 4a), mientras que cuando había inundación, el agua para medir la salinidad intersticial se extrajo con una flecha con fisuras cerca de la punta (Figura 4b), uniéndose en la parte de arriba una manguera de plástico muy delgada que servía para succionar el agua con una jeringa. Para la medición de la salinidad se utilizó un multiparamétrico *Ultrameter II 6 PFC E* (Myron L Co. California, EUA).



Figura 4.- (a) Toma de muestra de salinidad del agua intersticial; (b) succionando el agua intersticial y midiendo el nivel de inundación en el suelo con una regla; y (c) nivel de inundación en el sitio

Las muestras de suelo, guardadas y etiquetadas en bolsas plástico sellables se procesaron en el laboratorio. Se colocó una porción de muestra en el mortero aplicando un poco de agua desionizada y se trituró poco a poco hasta producir una pasta saturada de agua (Figura 5a). Sobre ésta se colocó un papel filtro grande y luego un disco o “confeti” de papel filtro que sirvió para tomar la muestra de agua a fin de que absorviera el agua colectada sin contaminarla con lodo (Figura 5a). La osmolalidad de la muestra de 0.01 ml se midió con la ayuda de un osmómetro (*Vapor Pressure Osmometer VAPRO 5520*, Wescor, Logan, Utah, EUA) (Figura 5b). Para poder calcular la equivalencia entre osmolalidad y potencial hídrico se realizó una curva de calibración entre potencial hídrico medido con una cámara C52 conectada a un psicrómetro Wescor HR-33T (Wescor, Wescor, Logan, Utah, EUA) y osmolalidad (medida con el osmómetro).

Los análisis estadísticos se realizaron en el programa *JMP* ver. 10 (*SAS Institute*, Cary, North Carolina, EUA) y las gráficas se realizaron en el programa *Sigmaplot* v. 10 (San José, California, EUA).



Figura 5.- (a) preparación de las muestras de suelo para su posterior lectura; (b) lectura con el osmómetro de las muestras de suelo de un sitio dañado

### **Muestreo de suelo y partes vegetales para medir el gradiente de potencial hídrico**

En cada sitio se seleccionaron 5 árboles de *A. germinans* de 3 a 5 m de altura, se marcaron con placas de aluminio, y posteriormente se llevó a cabo la selección y marcaje con *flagging* de pneumatóforos, ramas bajas y ramas altas en cada árbol, para aumentar la eficiencia de la colecta (Figura 6). También se tomó en cuenta la altura del árbol (desde el corte) midiendo del suelo hasta las copas alta y baja del árbol. Adicionalmente se tomaron tres muestras de suelo durante la época de sequía y de agua intersticial cuando ésta estaba disponible. Para tal fin se utilizó una jeringa “capada”, en donde se corta su extremo superior hasta dejar solamente un cilindro graduado.



Figura 6.- (a) Pneumatóforos; (b) marcaje de los árboles con placas de aluminio numeradas y ramas bajas; (c) ramas altas de *A. germinans*. Las flechas blancas indican ejemplos de pneumatóforo, ramas baja y rama alta que se cortarían para medir el potencial hídrico con la ayuda de una bomba de Scholander.

Las ramas seleccionadas tenían un aspecto sano y tallo recto para un buen manejo de la muestra. Se procedió a cortar con una tijera de podar limpia tres ramas altas y tres ramas bajas, con 4 a 6 hojas, de aproximadamente 10 cm de longitud. Las ramas se introdujeron en bolsas de plástico para evitar su transpiración y se guardaron en una hielera para reducir al máximo los cambios de temperatura y la disponibilidad de luz para transportarlas al laboratorio. Posteriormente, en el laboratorio, se procedió a medir el potencial hídrico utilizando una bomba de presión Scholander (*PMS Instrument Company, Albany, Oregon, EUA*) (Sellin, 1996). La hoja se colocó en el orificio de la tapa de la bomba de Scholander y la tapa se presionó y giró sobre la cámara para cerrarla herméticamente. Después se giró la manija de salida del gas nitrógeno para ingresarlo lentamente a la cámara. El ingreso del gas se detiene cuando se

observa que aparece una película de líquido o gotitas de agua (la savia) en la superficie del pecíolo cortado. Se cerró la válvula y se tomó la lectura del manómetro incluido en la cámara de presión (Figura 7-a-c) para después tomar una muestra de savia de aproximadamente 0.01 ml

Las mismas mediciones de potencial hídrico se realizaron en enero, junio y septiembre de 2013, un año después de la excavación de canales perpendiculares a los terraplenes que se realizó para restaurar el flujo hidrológico de la zona que estaba aislada por la construcción de los terraplenes.

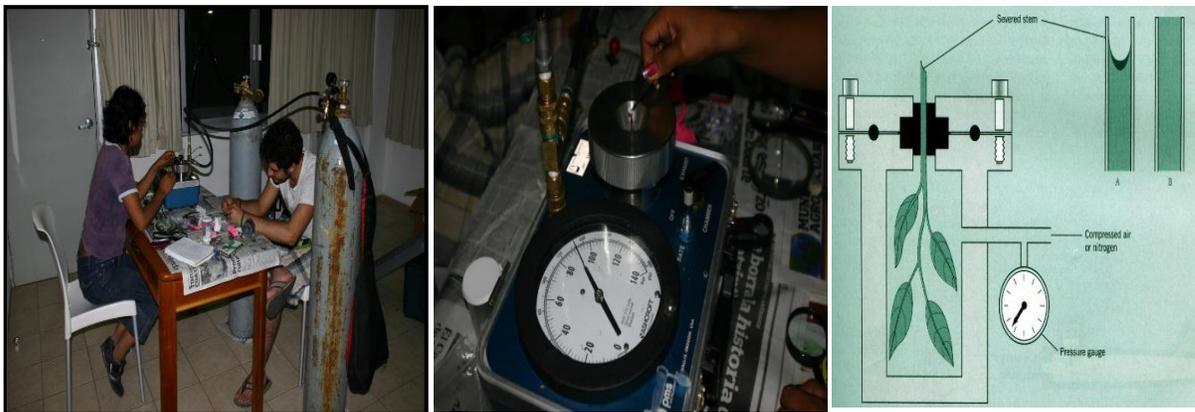


Figura 7.- (a) Procesamiento de las ramas de *A. germinans* para medir el potencial hídrico; (b) cámara de presión o la bomba de Scholander funcionando y (c) vista interna de la bomba Scholander en donde se muestra la savia retraída después de cortar la rama y la savia en la superficie del corte tras llegar a la presión de compensación.

Una vez listas todas las muestras, se procedió a medir la osmolalidad con el osmómetro. Las muestras de suelo y de agua intersticial se procesaron y midieron de la forma mencionada con anterioridad. El tiempo de lectura en el osmómetro fue de 80 segundos para cada muestra. Una vez obtenidas las mediciones se

procedió a calcular los gradientes de potencial osmótico de cada árbol y se comparó entre árboles ubicados en los sitios deteriorados y sitios estables (Davis *et al.*, 2002).

### **Seguimiento de supervivencia de los árboles en sitios contrastantes**

Se tomaron en cuenta los 10 árboles seleccionados en el trabajo anterior de Bartolo Mateos (2010) en cada uno de los sitios deteriorados y estables, con la finalidad de darle seguimiento y reconocer el avance del daño en los árboles. Para ello, se realizaron 3 muestreos en el 2011 tomando en cuenta la época de nortes, seca y lluvias (de la Lanza Espino *et al.* 1998; Travieso-Bello *et al.* 2005). Se registraron características como si las ramas más altas tenían o no hojas, presencia de hojas amarillas, ramas terminales secas, así como el color y aspecto de la corteza del tronco principal y de los pneumatóforos. Siguiendo la metodología desarrollada por Bartolo Mateos (2010), se distinguieron 6 etapas en la caracterización del daño en los árboles (Figura 8): etapa 1: Árbol sano sin muestras de estrés o tensión ambiental; etapa 1.2 intermedio:, las ramas terminales empiezan a morir ; etapa 2: todas las hojas terminales están muertas y el árbol sólo cuenta con ramas bajas; etapa 3: árbol muerto, pero ramas terminales finas presentes; etapa 4: las ramas finas se caen y quedan hasta ramas terciarias; etapa 5: quedan sólo ramas secundarias y el tronco principal; etapa 6: sólo está presente el tronco principal.

Esta caracterización sirvió para diseñar una escala cuantitativa que permitió distinguir diferencias en los árboles a lo largo del tiempo. Los datos obtenidos de todos los árboles en cada sitio se trabajaron por grupos de valores, obtenidos a partir de la media de los valores asignados al final de cada sitio.

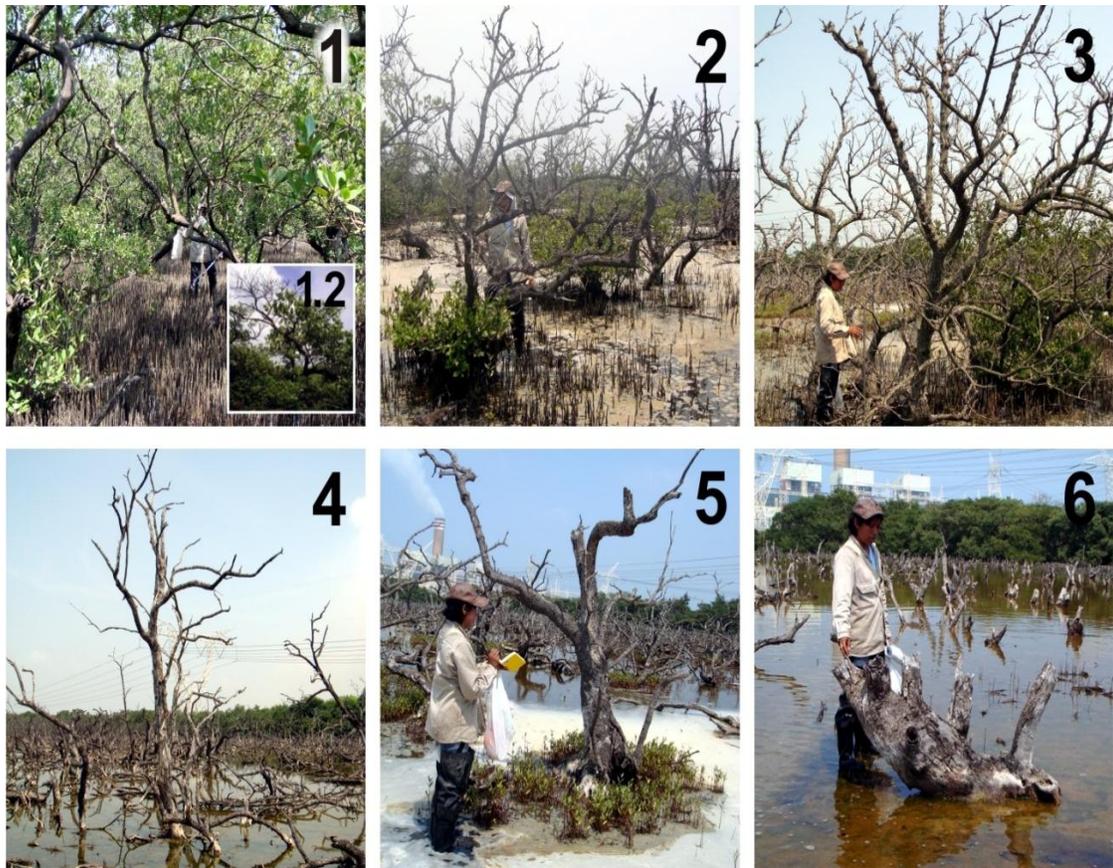


Figura 8. Etapas de daño de árboles de *Avicennia germinans* desarrolladas por Bartolo-Mateos (2010) y usadas para construir una escala cuantitativa de daño.

## VI. RESULTADOS

### 6.1 Nivel de Inundación

No hubieron diferencias entre el nivel de inundación del sitio estable y del sitio deteriorado asociado al terraplén central (Figura 9a) y las diferencias entre sitios fueron muy pequeñas en los sitios asociados al terraplén sur (Figura 9b). El suelo permaneció seco desde marzo hasta mayo independientemente del terraplén o el grado de perturbación. En febrero de 2011, en los sitios asociados al terraplén central, el nivel de inundación de los sitios fue de 3 a 4 cm, pero para mayo la profundidad de manto freático había disminuido hasta -70 cm y en junio a alrededor de -90 cm (Figura 9a). En julio volvieron a inundarse los sitios de muestreo, permaneciendo así hasta febrero de 2012, con un intervalo de 4 a 11 cm.

Para los sitios deteriorado y estable del terraplén sur (Figura 9b) el nivel de inundación siguió una tendencia similar que en el terraplén central, y las profundidades variaron en el mismo sentido. Tampoco hubo diferencias entre el sitio estable y el deteriorado de este terraplén.

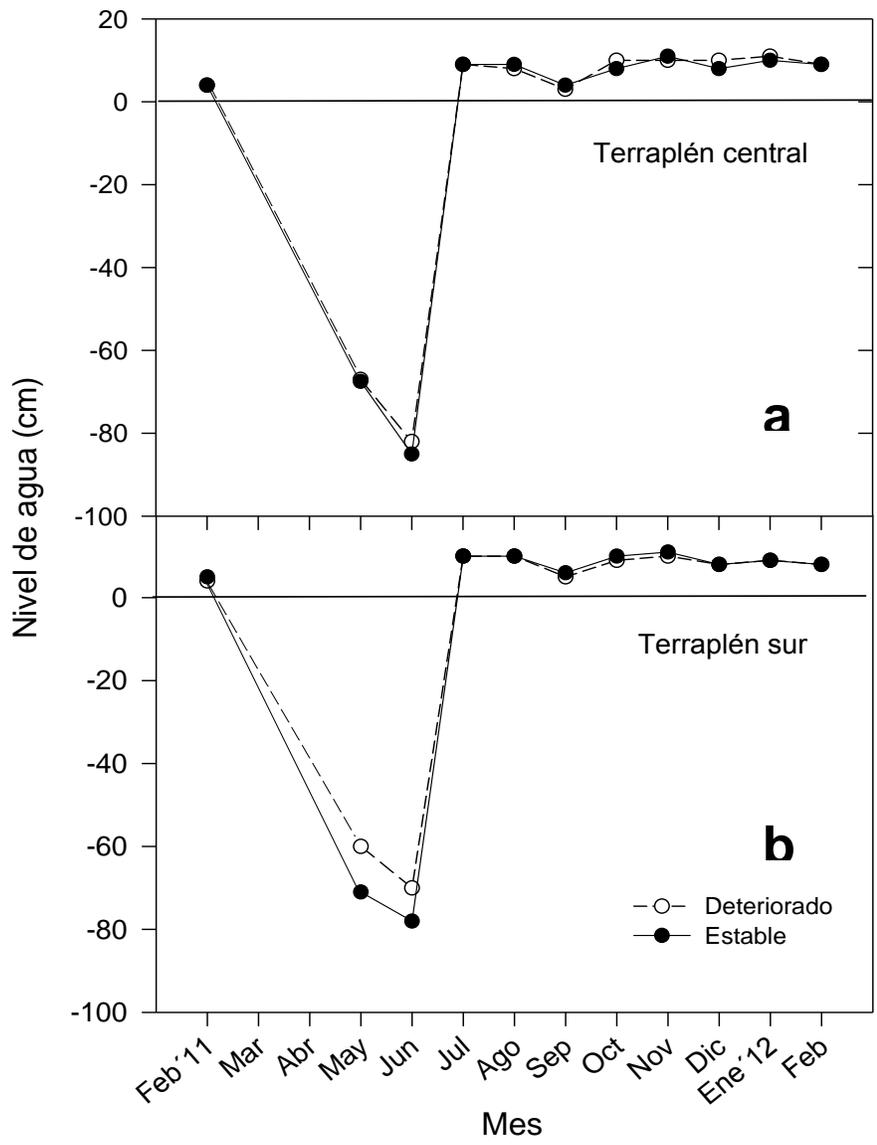


Figura 9.- Nivel de inundación en el sitio deteriorado (símbolos vacíos) del terraplén central y sitio estable (símbolos llenos) del terraplén central (a) y el terraplén sur (b).

## 6.2 Salinidad

La salinidad superficial en el terraplén central que abarcó el sitio dañado y el sitio estable tuvo variaciones considerables respecto a las épocas del año. Debido a que de marzo a junio no hubo inundación en los sitios de estudio, no fue posible tomar muestras para medir la salinidad, hasta que se colocaron los piezómetros a 1.5 m de profundidad en julio. Ya con los piezómetros, se obtuvo el registro de salinidad de 33 ups (unidades prácticas de salinidad) en el sitio estable mientras que para el sitio deteriorado fue de 28 ups, manteniéndose para el sitio estable en agosto. La salinidad aumentó de septiembre y octubre a 45 ups en el sitio estable y hasta 55 ups en el sitio deteriorado. La salinidad disminuyó marcadamente hacia noviembre hasta 33 ups en ambos sitios. Por último, la salinidad aumentó en diciembre para alcanzar 45 ups en ambos sitios en febrero (Figura 10 a).

En los sitios cercanos al terraplén sur la salinidad superficial fue menor en el sitio estable (28 ups) que en el sitio deteriorado (40 ups) en el sitio dañado. Esta es una tendencia que se mantuvo en agosto de 2011 y en enero y febrero de 2012, pero con valores de hasta 80 ups en los sitios deteriorados y de 50 a 60 ups en los sitios conservados, con una diferencia máxima entre sitios de 20 ups en febrero de 2012.

La salinidad intersticial fue en general mayor que la salinidad superficial tanto en los sitios de terraplén central como los del terraplén sur (Figura 10). En febrero, la salinidad del sitio deteriorado del terraplén central fue de 54 ups, mientras que la

del sitio estable fue de 41 ups. En los meses siguientes las salinidades fueron similares entre sitios, con valores que fluctuaron entre 60 y 70 ups (Figura 10c).

En los sitios asociados al terraplén sur (Figura 10d) la salinidad intersticial en febrero de 2011 del sitio deteriorado fue de 55 ups, mientras que para el sitio estable fue de 45 ups. En el resto de los meses, excepto de septiembre a noviembre, la salinidad fue mayor en el sitio perturbado, alcanzando un máximo (75 ups) en enero de 2012 mientras que en el sitio conservado la salinidad era de alrededor de 50 ups, una diferencia de 25 ups. En general, las pruebas de  $t$  pareadas indican que no hay diferencias en salinidad entre zonas deterioradas y estables, pero las salinidades son mayores en los meses de nortes (de diciembre a febrero).

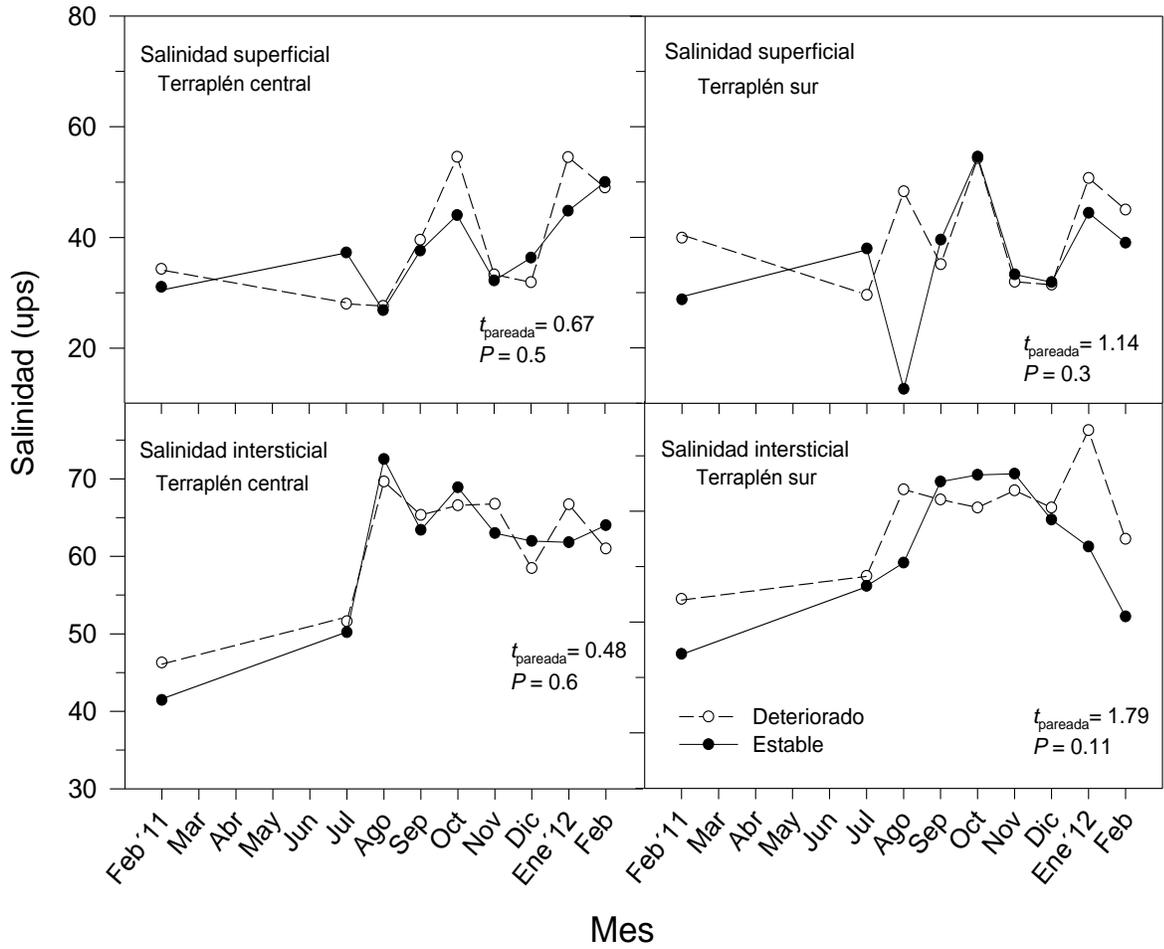


Figura 10.- Salinidad superficial e interstitial en el sitio deteriorado ubicado en el terraplén central y en el sitio estable ubicado en el terraplén sur.

### 6.3 Gradiente de potencial hídrico entre raíz-suelo-planta

En febrero de 2011 durante la temporada de nortes (Figura 11a) el potencial hídrico de *A. germinans* en el sitio estable fue de -3.5 MPa en el suelo, -5.0 MPa en la raíz y -5.8 MPa en la copa del árbol, teniendo una diferencia desde el suelo hasta las ramas altas de 1.3 MPa. En el sitio deteriorado, el potencial hídrico fue de -3.9 MPa en el suelo, -5.5 MPa en la raíz y -6 MPa en las ramas altas, con una diferencia desde el suelo hasta las ramas altas de 2.1 MPa.

En mayo de 2011, durante la época de secas, el potencial hídrico en el sitio estable alcanzó -4.5 MPa en el suelo, -8 MPa en la raíz y -8.4 MPa en las ramas más altas, habiendo una diferencia desde el suelo hasta las ramas altas de 3.9 MPa (Figura 11b). En el sitio deteriorado el suelo presentó un potencial hídrico de -7 MPa, la raíz -7.9 MPa y las ramas altas -9 MPa, con una diferencia desde el suelo hasta las ramas altas de de 2 MPa.

En septiembre de 2011, durante la época de lluvias, el potencial hídrico en el sitio estable fue de -3.9 MPa en el suelo, -5 MPa en la raíz y -6 MPa en las ramas altas, con una diferencia desde el suelo hasta las ramas altas de 2.1 MPa (Figura 11c). En la zona deteriorada el potencial hídrico del suelo fue de -5.2 MPa, -6.1 MPa en la raíz, -7.9 en las ramas bajas y -8.2 MPa en las ramas altas, desde el suelo hasta las ramas altas de 3 MPa.

Un año después de que se excavaran canales perpendiculares a los terraplenes para restaurar el flujo hidrológico (López-Portillo *et al.*, 2014) se volvieron a hacer las mismas mediciones en época de nortes, secas y lluvias para determinar si los gradientes de potencial hídrico eran similares a los de 2011. En enero de 2013 (durante la época de nortes), el potencial hídrico del suelo en el sitio estable fue de -3.3 MPa, en la raíz fue de -5 MPa y en las ramas altas fue de -6 MPa, habiendo una diferencia de la raíz a las ramas más altas del árbol de -2.8 MPa. En potencial hídrico del suelo en el sitio deteriorado fue de -3.3 MPa, en la raíz fue de las raíz de -5.3 MPa, y alrededor de -6 MPa en las ramas bajas y altas, con una diferencia de potencial hídrico del suelo hasta las ramas altas de 1.4 MPa (Figura 11d).

En junio de 2013, durante la época de secas, el potencial hídrico del suelo en el sitio estable fue de -4 MPa, el de la raíz fue de -4 MPa y en las ramas bajas y altas fue de -6.8 MPa, con una diferencia de potencial hídrico del suelo hacia las ramas altas de 2.8 MPa. En el sitio deteriorado, el potencial hídrico del suelo fue de -4.9 MPa, el de la raíz de -5 MPa y el de las ramas altas de alrededor de -7.2 MPa, con una diferencia de potencial hídrico de 2.3 MPa (Figura 11e).

En septiembre de 2013, durante la época de lluvias, el potencial hídrico de los árboles en el sitio estable fue de -2 MPa en el suelo, -2.9 MPa en la raíz y -4.7 MPa en las ramas bajas y altas, habiendo una diferencia de -2.7 MPa del suelo a la copa del árbol. Por otra parte, en el sitio deteriorado, el potencial hídrico en el suelo fue de -2.1 MPa, el de la raíz de -3.8 MPa y el de ramas bajas y altas de

alrededor de -6.1 MPa, con una diferencia entre el suelo y la copa de 4 MPa (Figura 11f).

#### **6.4 Comparación entre sitios estables y deteriorados**

De acuerdo a los análisis realizados de potencial hídrico en árboles de *A. germinans* en el año 2011, se observa que en cada época del año (lluvias, secas y nortes), el gradiente de potencial hídrico es más negativo del suelo a la copa del árbol, lo que garantiza el flujo de agua en esa dirección. Sin embargo, hay diferencias importantes entre épocas.

En febrero de 2011, la diferencia de potencial hídrico entre el sitio estable y el sitio deteriorado fue relativamente baja (0.2 MPa) y los potenciales hídricos fueron estadísticamente similares entre sitios (Figura 11a). En mayo de 2011, durante la época de secas, la diferencia de potencial hídrico entre el sitio dañado y el sitio estable fue más elevada, de 2 MPa, pero los potenciales hídricos fueron también similares entre sitios, aún cuando el potencial hídrico de los suelos fue mucho más negativo en las zonas deterioradas (Figura 11b). Por último, en septiembre de 2011, durante la época de lluvias, la diferencia de potencial fue la mayor de todas las épocas (4 MPa) y por primera vez hay diferencias significativas entre sitios en cada una de las partes que forma el gradiente hídrico: el los suelos, las raíces, las hojas bajas y las hojas altas (Figura 11c).

La comparación entre sitios y épocas dos años después arroja resultados similares en cuanto a tendencias, pero en general los potenciales hídricos fueron menos negativos que en 2011 excepto en enero de 2013, cuando los potenciales hídricos fueron ligeramente más negativos. Las diferencias de potenciales hídricos en enero y junio de 2013 (Figura 11d-e) estuvieron entre 2 y 2.5 MPa, ligeramente menores que en 2011 (Figura 11a-b). Sin embargo, en septiembre de 2013, durante la época de lluvias, ya no hay diferencias entre los potenciales hídricos de los suelos en la zona estable y la zona dañada (Figura 11f) y las diferencias entre raíces, hojas bajas y hojas altas se va incrementando, con diferencias máximas de 1.5 MPa entre las hojas altas de las zonas conservadas y las hojas altas de las zonas deterioradas.

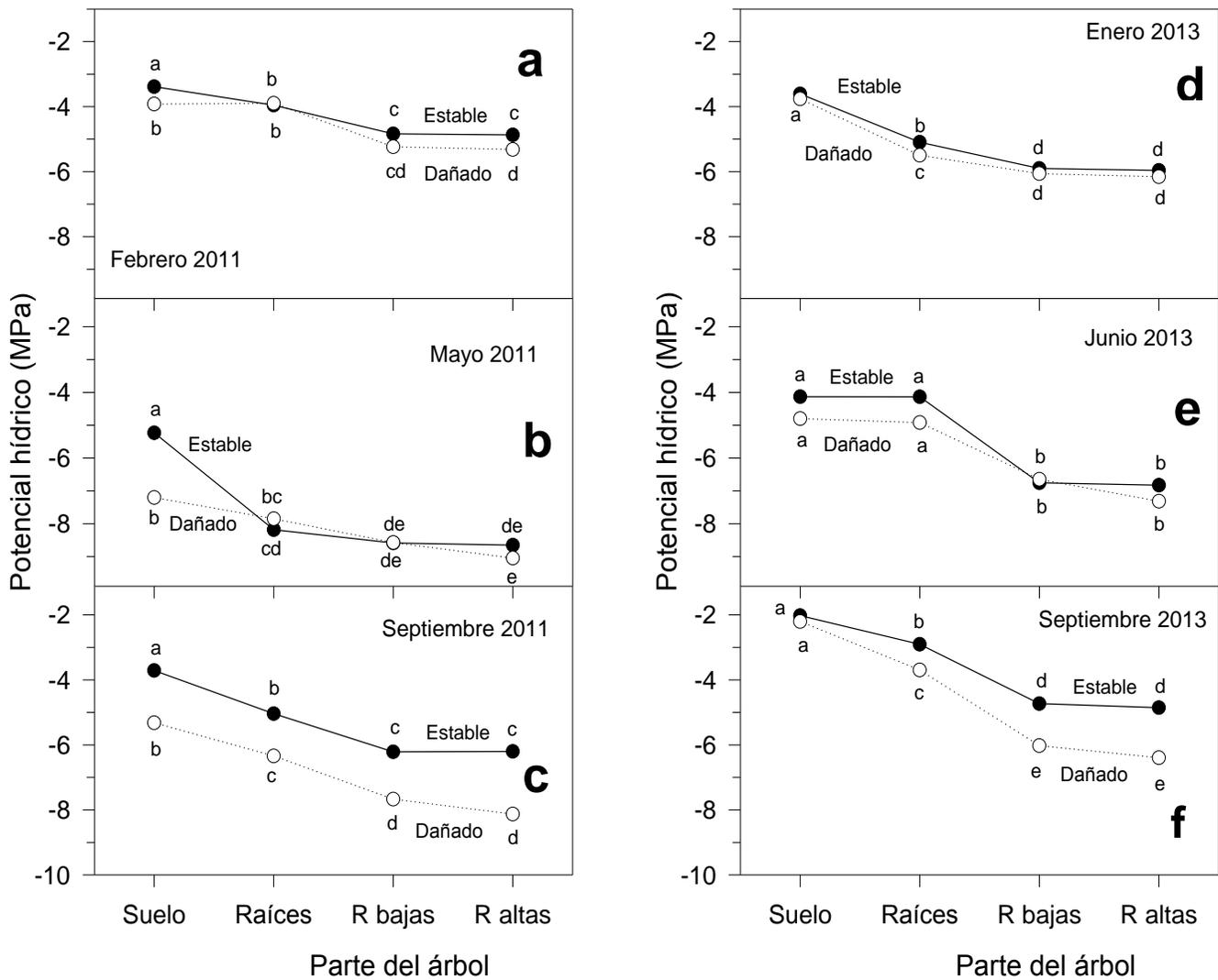


Figura 11.- Comparación de potencial hídrico en época de secas, lluvias y nortes en el periodo 2011-2013 en suelo, raíz, pneumatóforos, ramas altas y ramas bajas de *A. germinans*. En letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre niveles.

En la Figura 12 puede notarse que la hipótesis de trabajo ilustrada en la Figura 1 se cumple: el potencial hídrico disminuye (es más negativo) del suelo a la copa en los dos ambientes. Además, para cada parte analizada (suelo, raíces, ramas bajas y ramas altas), el potencial hídrico es más negativo (hay mayor estrés ambiental) en los sitios deteriorados que en los sitios conservados.

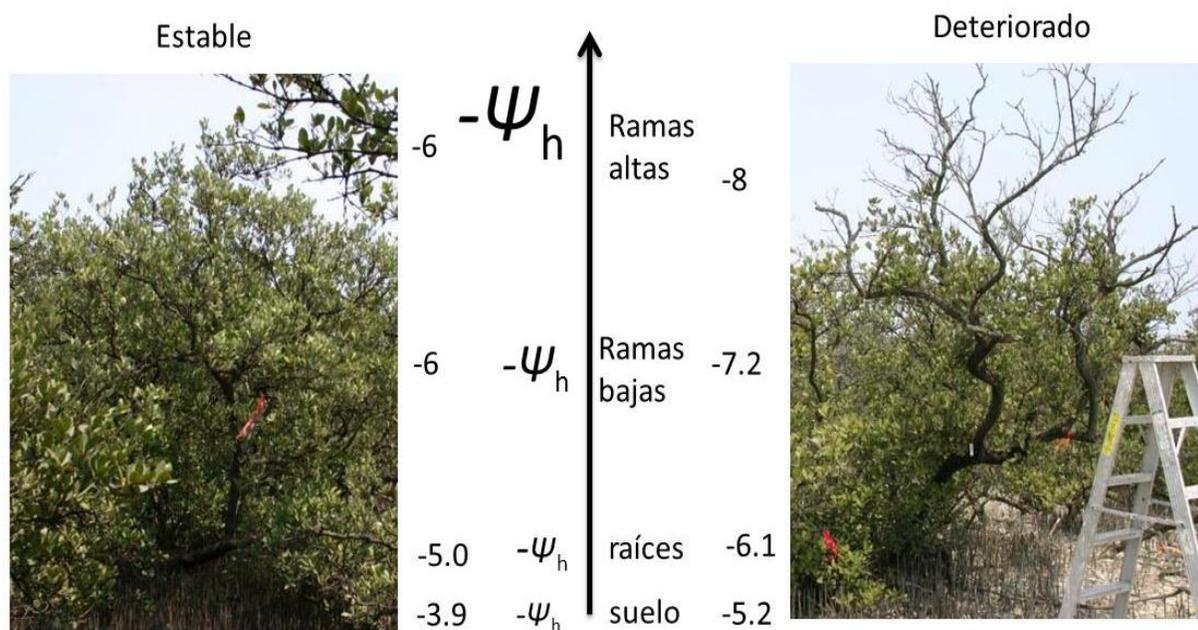


Figura 12. Comparación de la hipótesis de trabajo principal de esta tesis respecto al gradiente de potencial hídrico del suelo hasta la copa del árbol y el gradiente de potencial hídrico obtenido en septiembre de 2011 para los árboles en los sitios estables (izquierda) y deteriorados (derecha).

### 6.5 Estimación de daño en árboles de *Avicennia germinans*.

La Figura 13 muestra la comparación del puntaje de daño entre los sitios de estudio estable y deteriorado durante las tres épocas del año. Puede notarse cómo el puntaje de daño es consistentemente mayor en las zonas deterioradas cuando se le compara con las zonas estables. Esto indica que las zonas deterioradas tienden a deteriorarse aún más (esto es, que el daño es crónico) y que en uno de los sitios conservados hay signos de deterioro. El hecho que el deterioro tienda a aumentar de la época de nortes a la época de lluvias puede significar que el estrés ambiental aumenta en ese sentido, como también puede notarse al medir los potenciales hídricos en esa época.

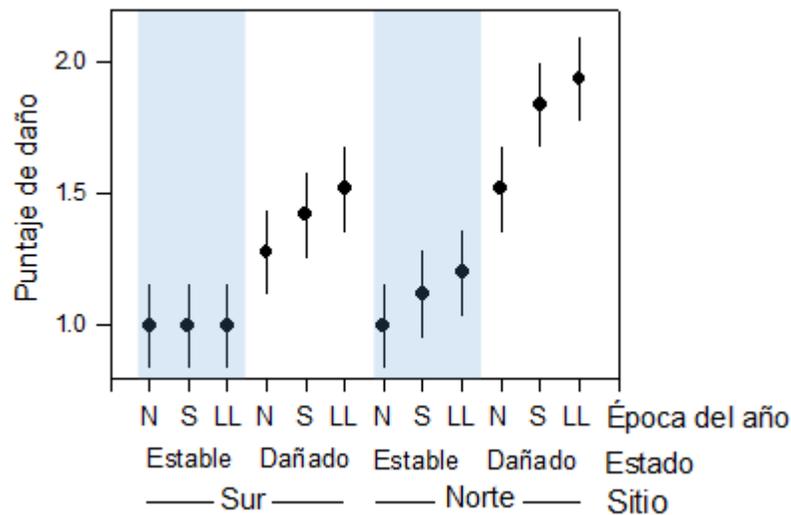


Figura 13.- Comparación entre sitios dañados y estables de acuerdo del puntaje de daño estimado sobre 10 árboles en cada uno de los 4 sitios de estudio.

## VII. DISCUSIÓN

La hipótesis de trabajo original era que en los árboles de *A. germinans* habría un gradiente de potencial hídrico que sería más negativo hacia la copa (Steudle, 2001; Nobel 2005; Lambers *et al.*, 2008). Esta hipótesis se cumplió y pudo documentarse tanto en las zonas estables como en las zonas deterioradas y en los años de 2011 y 2013. También se proponía que el potencial hídrico sería más negativo en las zonas deterioradas cuando se comparaba con las zonas estables, pero esto no se cumplió en todos los casos: los potenciales hídricos de las raíces, ramas bajas y ramas altas de los árboles fueron muy similares en las épocas de nortes y secas.

Durante la época de secas podría haberse esperado una mayor diferencia entre zonas conservadas y estables y también los efectos sobre la sobrevivencia de las ramas, pero no fue así. Por el contrario, la mayor diferencia entre sitios fue durante la época de lluvias, que generalmente se piensa como la época más favorable para la planta. Una explicación de estas diferencias es que la actividad del mangle (producción de hojas, flores, frutos y la fotosíntesis) disminuye notablemente durante la épocas de nortes y secas lo que es de esperarse ya que las especies de mangle son conservadoras de agua cuando aumenta la salinidad o la sequía (Ball, 1996; 2009) y que durante la época de lluvias, con humedades relativas y temperaturas elevadas, la demanda por transpiración es muy alta y esto afecta de más a los árboles de las zonas deterioradas porque tienen ya una historia de

estrés ambiental acumulada, tal como Rood *et al.* (2000) y Davis *et al.* (2002) han reportado para plantas de otros ecosistemas y Sobrado (2000) reportó experimentalmente para el mangle negro *Avicennia germinans*.

Por lo tanto, bajo estas condiciones de tensión ambiental, parte del xilema (el tejido encargado de, entre otras actividades, conducir agua de las raíces a las hojas) está afectado por embolismos y no es eficiente para conducir agua hacia las hojas, generando aún más embolismos, lo que ha sido caracterizado como “embolismo galopante” (*runaway embolism*; Tyree y Sperry, 1989). En consecuencia, las diferencias de 2 MPa entre suelos, raíces, ramas bajas y ramas altas entre árboles de zonas estables y zonas conservadas representan la diferencia entre la vida y la muerte de éstos, tal como se documenta en los árboles marcados para seguir su supervivencia.

La comparación entre 2011 y 2013 es también de gran interés, pues aunque las tendencias de los potenciales hídricos entre sitios son similares para cada época, los valores en los suelos tienden a ser menos negativos, lo que implica que está disminuyendo la salinidad por el efecto del lavado de sales generada por la apertura de canales. Esto debe seguirse a lo largo del tiempo para verificar si el sistema puede regresar a condiciones previas a la construcción de los terraplenes.

## VIII. CONCLUSIONES

La salinidad en los sitios estables y sitios deteriorados varía de acuerdo a la época del año, siendo la época de secas cuando se presentan los valores más altos para el sitio de muestreo, pero los datos de potencial hídrico indican que ésta no es la época de mayor tensión ambiental para las plantas de *A. germinans* en el área de estudio.

Después de la apertura de canales en los terraplenes en julio de 2012 el flujo y la renovación constante del agua de inundación favorecerán el lavado de las sales acumuladas por más de 20 años, especialmente durante la época de lluvias y tormentas tropicales. Con el paso del tiempo el intercambio de agua entre los sitios de estudio y el lavado de sales puede atenuar el daño crónico causado tanto en los árboles como en el suelo.

El daño en los árboles de *A. germinans* principalmente en las zonas deterioradas es más severo durante la época de lluvias. Es posible que esto se deba a que es cuando hay mayor actividad metabólica por fotosíntesis, crecimiento y transpiración lo que requiere un sistema de conducción de agua más eficiente, pero esto debe explorarse.

Se esperan signos de recuperación en las plantas de las zonas deterioradas, por la apertura de los canales y una disminución de la salinidad en los suelos, pero esto dependerá del nivel de daño crónico del sistema de conducción hídrica de los árboles y de la acumulación de fotosintatos. Se esperaría un mayor crecimiento en las ramas bajas sobrevivientes, lo que permitiría la recuperación de los individuos y su eventual crecimiento en altura.

## APLICACIÓN PRÁCTICA DEL TRABAJO

Los resultados de esta tesis son particularmente importantes para estudios de reforestación con especies de mangle como *R. mangle*, *A. germinans* y *L. racemosa* porque en términos prácticos quiere decir que debe conocerse previamente el potencial hídrico de los suelos en donde se va a realizar la reforestación y antes de sembrar las plantas que fueron cultivadas en invernadero. Si las plantas del invernadero crecen bajo condiciones menos salinas que las del suelo en donde van a ser sembradas, entonces el potencial hídrico de éstas será menos negativo que el potencial hídrico de los suelos y el agua de la planta fluirán hacia el suelo, causando la deshidratación y muerte de ésta.

En términos prácticos, para fines de reforestación, se recomienda medir el potencial hídrico de las plántulas de vivero y compararlo con el potencial hídrico en el sitio en donde serían sembradas. Si la diferencia es muy grande, entonces deben aclimatarse, aumentando gradualmente la salinidad del agua de riego. Los beneficios de medir previamente el potencial hídrico a plántulas de vivero, redundarán en una mayor supervivencia y por tanto en una mejor relación costo-beneficio.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agraz-Hernández C., R. Noriega, J. López-Portillo, F. Flores-Verdugo y J. Jiménez-Zacarías. 2006 Identificación de los manglares en México. EPOMEX-INECOL-CONAFOR.45.pp.  
[http://etzna.uacam.mx/epomex/pdf/Guia\\_Manglar.pdf](http://etzna.uacam.mx/epomex/pdf/Guia_Manglar.pdf)
- Ball, M. C. y S.M. Pidsley. 1995 Growth responses to salinity in relation to distribution of two mangrove species. *Functional Ecology* 9:77-85.
- Ball, M. C. 1996 Comparative ecophysiology of mangrove forest and tropical lowland moist rainforest. En: S.S. Mulkey, R. L. Chazdon y A. P. Smith (editores) *Tropical Forest Plant Ecophysiology*. Chapman y Hall, Nueva York. pp. 461–496.
- Bartolo Mateos, O. 2010 Mortalidad de Manglar asociado a la Laguna de Tampamachoco, Tuxpan, Veracruz. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana.
- Boa, E. 2008 Guía ilustrada sobre el estado de salud de los árboles. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación – FAO y Organismo Internacional Regional de Sanidad Agropecuaria – OIRSA. San Salvador, El Salvador.

<http://www.fao.org/docrep/010/y5041s/y5041s00.HTM>

Conabio. 2008 Manglares de México. México, D.F. 16-35 pp.

<http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/manglares/doctos/manglares.html>

Davis, S.D., F.W. Ewers, J.S. Sperry, K.A. Port wood, M. C. Crocker, G. C. Adams. 2002 Shoot dieback during prolonged drought in *Ceanothus* (*Rhamnaceae*) chaparral of California: a possible case of hydraulic failure. *American Journal of Botany* 89: 820-828.

De la Lanza Espino, G., N.S. Santillán y A.E. Herrera. 1998. Análisis temporal y espacial fisicoquímico de una laguna tropical a través del análisis multivariado. *Hidrobiológica* 8: 89-96.

Elster, C. 2000. Reasons for reforestation success and failure with three mangrove species in Colombia. *Forest Ecology and Management* 131: 201-214.

Ewel K.C., Twilley R.R. y J. Ong. 1998. Different kinds of mangrove forests provides different goods and services. *Global Ecology and Biogeography Letters* 7: 83-94.

- Ewers F.W., J. López-Portillo, G. Angeles, y J.B. Fisher. 2004. Hydraulic conductivity and embolism in the mangrove tree *Laguncularia racemosa*. *Tree Physiology* 24, 1057–1062.
- Flores-Verdugo, F., P. Moreno-Casasola, C. Agraz-Hernández, H. López-Rosas, D. Benítez-Pardo y A. C. Travieso-Bello. 2007. La topografía y el hidroperíodo: dos factores que condicionan la restauración de los humedales costeros. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 80: 33-47.
- Hellkvist, J., G. Richards y P.G. Jarvis. 1974. Vertical gradients of water potential and tissue water relations in Sitka spruce trees measured with the pressure chamber. *Journal of Applied Ecology* 11: 637-667.
- Kathiresan, K. y B.L. Bingham. 2001. Biology of Mangroves and Mangrove Ecosystems. *Advances in Marine Biology* 40: 81-251.
- Kim, H. K., J. Park, e I. Hwang. 2014. Investigating water transport through the xylem network in vascular plants. *Journal of Experimental Botany* 65: 1895-1904.
- Lambers, H., F. S. Chapin III y T. L. Pons. 2008. *Plant Physiological Ecology*. Segunda edición, Springer Verlag, Nueva York. pp: 34-36.

López-Portillo, J. y E. Ezcurra. 1989. Zonation in mangrove and salt marsh vegetation in relation to soil characteristics and species interactions at the Laguna de Mecoacan, Tabasco, Mexico. *Biotropica* 21: 107-114.

López-Portillo, J. y E. Ezcurra. 2002. Los manglares de México: una revisión. *Madera y Bosques*. Número especial: 27-51.

López-Portillo, J., F. W. Ewers y G. Angeles. 2005. Sap salinity effects on xylem conductivity in two mangrove species. *Plant, Cell and Environment* 28: 1285-1292.

López-Portillo, J. A., Ma. Luisa Martínez, Patrick Hesp, Jose Ramón Hernández, Victor M. Vásquez Reyes, León Rodrigo Gómez Aguilar, Ana Patricia Méndez, Oscar Jimenez-Orocio, Sheila L. Gachuz Delgado; Secretaria de Educación del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, 2011. Atlas de las Costas de Veracruz Manglares y Dunas 25-68-69 p.

López-Portillo, J. A. 2012. Programa regional para la caracterización y el monitoreo de ecosistemas de manglar del Golfo de México y Caribe Mexicano: inicio de una red multi-institucional. Veracruz. Instituto de Ecología A.C. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. FN007. México D. F.

<http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfFN007.pdf>

López-Portillo, J. A., A. L. Lara-Domínguez, E. Sáinz Hernández, V. M. Vásquez, M. Rodríguez, M. del C. Martínez, O. Bartolo, I.I. Ortiz y G. Alvarado. 2014. *Restauración hidráulica en la laguna de Tampamachoco para la rehabilitación del manglar y de sus servicios ambientales*. Instituto de Ecología A.C. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. HH025. México D. F.

Medina, E., A. E. Lugo y A. Novelo. 1995. Contenido mineral del tejido foliar de especies de manglar de la Laguna de Sontecomapan (Veracruz, México) y su relación con la salinidad. *Biotropica* 27:317-323.

Méndez-Alonzo, R., H. Hernández-Trejo y J. López-Portillo. 2012. Salinity constrains size inequality and allometry in the black mangrove, *Avicennia germinans*. *Journal of Tropical Ecology* 28: 171-179

Montes-Cartas, C. G. 2002. Potencial hídrico y conductancia estomática en 2 especies de manglar (*Avicennia germinans* (L.) L. y *Rhizophora mangle* L.) *Tesis de Maestría*, Universidad Nacional Autónoma de México. 82 pp

Naidoo, G. 1984. Effects of flooding on leaf water potential and stomatal resistance in *Bruguiera gymnorrhiza* (L.) Lam. *New Phytologist* 93:369-376.

- Naidoo, G. 1985. Effects of waterlogging and salinity on plant-water relations and on the accumulation of solutes in three mangrove species. *Aquatic Botany* 22:133-143.
- Nobel, P.S. 2005. Physicochemical and environmental plant physiology. Academic Press-Elsevier, Oxford, Gran Bretaña, 489 pp.
- Rico-Gray, V. y M. Palacios-Ríos. 1996. Leaf area variation in *Rhizophora mangle* L. (*Rhizophoraceae*) along a latitudinal gradient in México. *Global Ecology and Biogeography Letters* 5: 30-35.
- Rood, S.B., S. Patino, K. Coombs, M. T. Tyree. 2000. Branch sacrifice: cavitation associated drought adaptation of riparian cotton woods. *Trees* 14: 248–257.
- Scholander, P.F. 1968. How mangroves desalinate sea water. *Physiologia Plantarum* 21: 251-261.
- Scholander P.F., H.T. Hammel, E. Hemmingsen, y W. Garey. 1962. Salt balance in mangroves. *Plant Physiology* 37: 722-729.
- Scholander, P. F., E.D. Bradstreet, E.A. Hemmingsen, y H.T. Hammel. 1965. Sap pressure in vascular plants. Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science* 148: 339-346.

- Sobrado, M. A. 2000.. Leaf photosynthesis of the mangrove *Avicennia germinans* as affected by NaCl. *Photosynthetica*, 36: 547-555.
- Steudle, E. 2001. The cohesion-tension mechanism and the acquisition of water by plant roots. *Annual Review of Plant Biology* 52: 847-875.
- Sellin, A. 1996. Base water potential of *Picea abies* as a characteristic of soil moisture status. *Plant and Soil* 184: 273-280.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 2002. Plant Physiology. Tercera edición, Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts, EUA. 690 pp.
- Travieso-Bello, A.C., P. Moreno-Casasola y A. Campos. 2005. Efecto de diferentes manejos pecuarios sobre el suelo y la vegetación en humedales transformados a pastizales. *Interciencia* 30: 12-18.
- Twilley, R.R. y V.H. Rivera-Monroy. 2009. Ecogeomorphic models of nutrient biogeochemistry for mangrove wetlands. En: G.M.E. Perillo, E. Wolanski, D.R. Cahoon y M.M. Brinson (editores) *Coastal wetlands: an integrated ecosystem approach*. Elsevier, Amsterdam, Holanda, pp: 641-684.

Tyree, M. T., y J. S. Sperry, J. S. 1989. Vulnerability of xylem to cavitation and embolism. *Annual Review of Plant Biology* 40: 19-36.

Tovilla, C. y D.E. Orihuela B. 2002. *Manual de técnicas y métodos de restauración de zonas alteradas en manglares*. El Colegio de la Frontera Sur. Tapachula Chiapas, México. 8 p.

Valiela, I., J.L. Bowen, J.K. York. 2001. Mangrove forests: one of the world's threatened major tropical environments. *Bioscience* 51: 807-815.

Zar, J. H. 1999. *Biostatistical analysis*. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, NJ. 663 pp.