

Informe final* del Proyecto GH009
Rehabilitación de manglares en el estado de Yucatán sometidos a diferentes condiciones hidrológicas y nivel de impacto: el caso de Celestún y Progreso

Responsable: Dr. Jorge Alfredo Herrera Silveira
Institución: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Mérida
Dirección: Carretera Antigua a Progreso Km 6, Cordemex, Mérida, Yuc, 97310, México
Correo electrónico: jherrera@mda.cinvestav.mx
Teléfono/Fax: (999) 942 9462, Fax: (999) 9812334
Fecha de inicio: Noviembre 14, 2008.
Fecha de término: Julio 4, 2012.
Principales resultados: Hojas de cálculo, fotografías, informe final.
Forma de citar el informe final y otros resultados:** Herrera-Silveira, J.A., Zaldivar-Jimenez, A., Teutli-Hernández, C., Pérez-Ceballos, R., Caamal, J. y T. Andueza. 2012. Rehabilitación de manglares en el estado de Yucatán sometidos a diferentes condiciones hidrológicas y nivel de impacto: el caso de Celestún y Progreso. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. Unidad Mérida. **Informe Final SNIB-CONABIO. Proyecto GH009.** México, D.F.

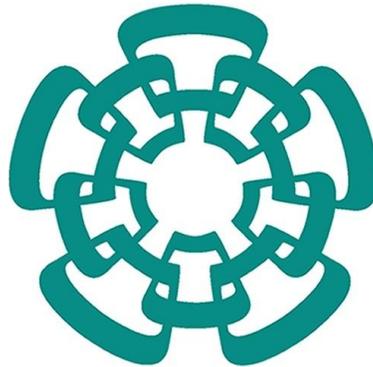
Resumen:

La superficie de manglares en la Península de Yucatán es mas del 50% del total del País, sin embargo, se ha estimado que la pérdida ha sido muy grande a consecuencia de actividades industriales, portuarias, desarrollos urbanos y turísticos, además de los efectos por los huracanes. Esto ha motivado desde hace 15 años por parte del Gobierno Federal, Estatales, ONG's de Yucatán hayan desarrollado acciones tendientes a recuperar la superficie de manglar a través de acciones de reforestación o forestación, construcción de pasos de agua en carreteras, desasolvar manantiales, entre otras. Sin embargo, los esfuerzos han sido poco exitosos y con alto costo económico y en ocasiones con desanimo de grupos sociales que participaron en dichos proyectos. Entre las causas de este bajo éxito se pueden enumerar la falta de una caracterización ambiental y de información técnico-experimental que oriente los pasos a seguir en un escenario de características cársticas. Con el propósito de revertir este problema y avanzar en la conservación y rehabilitación de los manglares de la PY, desde 2006 se integró un grupo de trabajo para el estudio y manejo sustentable de los humedales costeros de Yucatán, participando instituciones académicas (CINVESTAV, LSU, CICY), instituciones del gobierno federal (CONANP), así como ONG's (DUMAC y ATEC). Este grupo ha venido desarrollando acciones de rehabilitación de los manglares. Por ejemplo, en 2006 la CONANP junto con JICA inician un proyecto de rehabilitación (8 ha) de manglares en Celestún (sitio Ramsar, Reserva de la Biosfera, sitio AICA), sin embargo, los éxitos y fracasos no están documentados y por lo tanto no pueden replicarse o evitarse. En 2007 DUMAC con fondos de CONAFOR inicia una serie de acciones (microtopografía, caracterización de la salinidad intersticial, construcción de canales) para continuar la rehabilitación de 35 ha de manglar. Por otra parte los manglares del puerto de Progreso han sido seriamente afectados por actividades asociadas al desarrollo portuario, lo cual ha llevado al Grupo en coordinación con la Novena Zona Naval en Yucalpetén (Secretaría de Marina), a iniciar acciones encaminadas a identificar las causas locales y regionales del deterioro y muerte del manglar para proponer acciones que permitan rehabilitar las condiciones ambientales, favorecer la autorregulación del ecosistema de manglar y la recuperación de sus funciones. Esta propuesta que se somete a CONABIO pretende sumarse a estos dos esfuerzos para promover acciones y documentar la rehabilitación de manglares con un enfoque más experimental, de participación interinstitucional y comunitaria, y no de ensayo-error y descoordinación, teniendo como indicadores de éxito las medidas de funcionamiento de los manglares. Durante el proyecto se proponen acciones como construcción y/o rehabilitación de canales, reforestación y seguimiento de la sobrevivencia bajo condiciones variables. Se llevarán

acabo análisis de agua, sedimentos, densidad y sobrevivencia de plántulas, productividad aérea y subterránea de plántulas tanto de sitios a rehabilitar como de referencia. Se promoverá la participación de grupos locales además de las instituciones del grupo de trabajo y otras para adecuar programas de capacitación y educación ambiental. Consideramos que existe un gran potencial para que las áreas impactadas y propuestas a rehabilitar se conviertan no únicamente en sitios de demostración para desarrollar planes estratégicos de rehabilitación de manglares en la Península de Yucatán, sino también para desarrollar estudios técnicos paralelos de rehabilitación de funciones de los manglares y que permitan fundamentar acciones de manejo incluidas la reforestación, fertilización y obras de ingeniería ecológica localizadas. Una de las innovaciones de este proyecto de rehabilitación es la de poder dar seguimiento a las variaciones de hidroperiodo, salinidad y fertilidad del suelo, en dos sitios de manglar impactado que pertenecen a la misma región pero que están bajo diferentes condiciones hidrológicas, de intensidad de uso y con estatus de manejo diferente al estar uno de ellos en una ANP (Celestún) y el otro no (Puerto Progreso). Este marco metodológico permitirá avanzar con mayor rapidez hacia una estrategia general de la rehabilitación ecológica de bosques de manglar de la Península de Yucatán, considerando que las acciones son específicas de acuerdo a las características del manglar impactado.

- * El presente documento no necesariamente contiene los principales resultados del proyecto correspondiente o la descripción de los mismos. Los proyectos apoyados por la CONABIO así como información adicional sobre ellos, pueden consultarse en www.conabio.gob.mx
- ** El usuario tiene la obligación, de conformidad con el artículo 57 de la LFDA, de citar a los autores de obras individuales, así como a los compiladores. De manera que deberán citarse todos los responsables de los proyectos, que proveyeron datos, así como a la CONABIO como depositaria, compiladora y proveedora de la información. En su caso, el usuario deberá obtener del proveedor la información complementaria sobre la autoría específica de los datos.

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL



CINVESTAV-INP
Unidad Mérida

Informe Técnico Final GH009

REHABILITACIÓN DE MANGLARES EN EL ESTADO DE YUCATÁN SOMETIDOS A DIFERENTES CONDICIONES HIDROLÓGICAS Y NIVEL DE IMPACTO: EL CASO DE CELESTÚN Y PUERTO PROGRESO

Participantes:

Dr. Jorge Herrera-Silveira

M. en C. Arturo Zaldívar-Jiménez

M. en C. Rosela Pérez-Ceballos

M. en C. Claudia Teutli-Hernández

I.Q. Elsy Alvarado

Biól. Juan Caamal

Biól. Ma.Teresa Andueza

Abril de 2011

FORMA DE CITARSE

Herrera-Silveira, J.A., Zaldivar-Jimenez, A., Teutli-Hernández, C., Pérez-Ceballos, R., Caamal, J. y T. Andueza. 2012. Rehabilitación de manglares en el estado de Yucatán sometidos a diferentes condiciones hidrológicas y nivel de impacto: el caso de Celestún y Progreso. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. Unidad Mérida. **Informe Final SNIB-CONABIO. Proyecto GH009.** México, D.F.

CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	Pág. 4
II.	OBJETIVOS	6
III.	DESCRIPCIÓN DE LAS AREAS DE REHABILITACIÓN	7
	III.1 Celestún	7
	III.2 Progreso	9
IV.	ANTECEDENTES DE REHABILITACIÓN EN CADA LOCALIDAD	9
V.	REHABILITACIÓN DE LOS MANGLARES EN CELESTÚN	10
	V.1 Caracterización ambiental del sitio: Celestún	10
	V.2 Resultados de la caracterización: Celestún	13
	V.3 Acciones de rehabilitación y programa de monitoreo: Celestún	21
VI.	RESULTADOS DEL MONITOREO: CELESTÚN	23
	VI.1 Variables ambientales	23
	VI.2 Centros de dispersión	30
	VI.3 Regeneración de la vegetación	31
	VI.4 Monitoreo de la productividad de hojarasca: Celestún	33
VII.	REHABILITACION DE LOS MANGLARES EN PUERTO PROGRESO	35
	VII.1 Caracterización ambiental del sitio: Progreso	35
	VII.2 Resultados de la caracterización: Progreso	39
	VII.3 Acciones de rehabilitación y programa de monitoreo: Progreso	44
VIII.	RESULTADOS DEL MONITOREO: PROGRESO	46
	VIII.1 Variables ambientales	46
	VIII.2 Centros de dispersión	48
	VIII.3 Regeneración de la vegetación	49
	VIII.4 Monitoreo de la producción de hojarasca: Progreso	51
IX.	MONITOREO DEL HIDROPERIODO	52
	IX.1 Hidroperiodo de Celestún	52
	IX.2 Hidroperiodo Progreso	59
X.	COSTOS DE LA REHABILITACIÓN	63
XI.	CONSIDERACIONES FINALES	64

I. INTRODUCCIÓN

La superficie de manglares en la Península de Yucatán es más del 50% del total del País, sin embargo, se ha estimado que la pérdida ha sido muy grande a consecuencia de actividades industriales, portuarias, desarrollos urbanos y turísticos, además de los efectos por los huracanes. Esto motivó que desde hace 15 años hasta la fecha por parte del Gobierno Federal, Estatales, ONG's de Yucatán se desarrollen acciones tendientes a recuperar la superficie de manglar a través de acciones de reforestación o forestación, construcción de pasos de agua en carreteras, desazolvar manantiales, entre otras. Sin embargo, los esfuerzos han sido poco exitosos y con alto costo económico, incluso, en ocasiones con desanimo de grupos sociales que participaron en dichos proyectos.

Entre las causas de este bajo éxito se pueden enumerar la falta de una caracterización ambiental y de información técnico-experimental que orientará los pasos a seguir en un escenario de características cársticas. Con el propósito de revertir este problema y avanzar en la conservación y rehabilitación de los manglares de la PY, desde 2006 se integró un grupo de trabajo para el estudio y manejo sustentable de los humedales costeros de Yucatán, participando instituciones académicas (CINVESTAV, LSU, CICY), instituciones del gobierno federal (CONANP, SEMARNAT), así como ONG's (DUMAC y ATEC). Este grupo ha venido desarrollando acciones de rehabilitación de los manglares. Por ejemplo, en 2006 la CONANP junto con JICA inician un proyecto de rehabilitación (8 ha) de manglares en Celestún (sitio Ramsar, Reserva de la Biosfera, sitio AICA), sin embargo, los éxitos y fracasos no están documentados y por lo tanto no pueden replicarse o evitarse aquellas acciones no exitosas.

En 2007 DUMAC con fondos de CONAFOR inicia una serie de acciones (microtopografía, caracterización de la salinidad intersticial, construcción de canales) para continuar la rehabilitación de 35 ha de manglar.

Por otra parte, los manglares del puerto de Progreso han sido seriamente afectados por actividades asociadas al desarrollo portuario, lo cual ha llevado al Grupo en coordinación con la Novena Zona Naval en Yucalpetén (Secretaría de Marina) y SEMARNAT, a iniciar acciones encaminadas a identificar las causas locales y regionales del deterioro y muerte del manglar para proponer acciones que permitan rehabilitar las condiciones ambientales, favorecer la autorregulación del ecosistema de manglar y la recuperación de sus funciones.

Esta propuesta que se sometió a CONABIO se sumo a estos dos esfuerzos para promover acciones y documentar la rehabilitación de manglares con un enfoque más experimental, de participación interinstitucional y comunitaria, y no de ensayo/error y descoordinación, teniendo como indicadores de éxito las medidas de funcionamiento de los manglares.

Para alcanzar la meta de rehabilitar condiciones ambientales (corto-plazo) que favorecieran el establecimiento, crecimiento (mediano-plazo) y desarrollo de una comunidad de manglar (en el largo-plazo), se llevaron a cabo acciones como construcción, rehabilitación de canales, reforestación experimental, y el seguimiento de variables ambientales y biológicas.

Se llevaron a cabo análisis de agua, sedimentos, densidad y sobrevivencia de plántulas, productividad aérea y subterránea de plántulas tanto de sitios a rehabilitar como de referencia.

Se promovió la participación de grupos locales además de las instituciones del grupo de trabajo y otras para adecuar programas de capacitación y educación ambiental.

Consideramos que existe un gran potencial para que las áreas impactadas y propuestas a rehabilitar se conviertan no únicamente en sitios de demostración para desarrollar planes estratégicos de rehabilitación de manglares en la Península de Yucatán, sino también para desarrollar estudios técnicos paralelos de rehabilitación de funciones de los manglares y que permitan fundamentar acciones de manejo incluidas la reforestación, fertilización y obras de ingeniería ecológica localizadas.

Una de las innovaciones de este proyecto de rehabilitación fue, darle seguimiento a las variaciones de hidroperiodo, salinidad intersticial y características del sedimento en dos sitios de manglar impactado que pertenecen a la misma región pero que están bajo diferentes condiciones hidrológicas y de intensidad de uso: Puerto Celestún y Puerto Progreso.

Este marco metodológico permitirá avanzar con mayor rapidez hacia una estrategia general de la rehabilitación ecológica de bosques de manglar de la Península de Yucatán, considerando que las acciones son específicas de acuerdo a las características del manglar impactado.

II. OBJETIVOS

Objetivo general:

Implementar un plan de rehabilitación de manglares con un enfoque comunitario participativo en áreas costeras cársticas utilizando zonas piloto a diferentes escalas espaciales, con medidas de éxito basadas en las funciones del ecosistema de manglar.

Objetivos particulares:

- 1) Establecer centros de dispersión de plántulas en localidades con diferentes factores ecológicos (hidroperiodo, estresares, recursos, nivel de impacto) que permitan un mejor establecimiento y crecimiento de las especies de manglar dominantes en las zonas a rehabilitar.
- 2) Evaluar las trayectorias de rehabilitación de manglares de zonas cársticas como las de Yucatán con base en una sucesión ecológica que promueva un auto-mantenimiento a largo plazo.
- 3) Promover actividades de divulgación, difusión y capacitación a diferentes niveles así como promover la participación comunitaria en el desarrollo de programas de rehabilitación y conservación de manglares a nivel local y regional de la Península de Yucatán.

III. DESCRIPCIÓN DE LAS ÁREAS DE REHABILITACIÓN

III.1 Celestún: El área de estudio de puerto Celestún forma parte de la reserva de la Biósfera Ría Celestún, que pertenece a la CONANP. Se localiza en la costa noroeste de la Península de Yucatán (PY) con una superficie de 81,482.33 ha, comprendida en los municipios de Celestún y Maxcanú, en el estado de Yucatán, y Calkiní en el estado de Campeche. Forma parte de la Región terrestre prioritaria de México No. 145 (Arriaga et al., 2000) y sitio RAMSAR (2004). Región marina prioritaria de México No. 60-Champotón –El Palmar (Arriaga et al., 1998); región hidrológica prioritaria No. 102-Anillo de cenotes (Arriaga et al., 2002), y área de Importancia para la Conservación de las Aves (AICAS) No. 183 clave de la SE-38-Ría Celestún. El clima en la región es calido semí–seco con lluvias en verano y escasas el resto del año del tipo BS1 (h') w(c). La temperatura promedio anual es de 26.5 °C. La tasa de evaporación promedio para la región es de 1,400 mm durante el año y la precipitación promedio anual es de 767 mm. Presenta las épocas características de la península (nortes, lluvias y secas). El sustrato base se compone principalmente de calizas del período terciario, lo que favorece que la lluvia se infiltre rápidamente disolviendo la roca y formando un relieve denominado “karst” o cárstico, dando origen a los característicos cenotes/manantiales de esta región.

El área seleccionada para rehabilitación está asentada en la periferia de la zona urbana de Celestún (Fig. 1a), y el área efectiva de rehabilitación consiste en 30 ha. Aunque esta localización puede tener impactos antrópicos directos (depósito de basura, extracción de madera, por ejemplo), la recuperación de las funciones de manglar son una prioridad desde el punto de vista de recuperación de hábitat y estética que pueden acelerar el desarrollo del ecoturismo en este sitio; esta última es una actividad económica importante en el municipio. Los sedimentos son principalmente orgánicos como producto de la acumulación de materiales del manglar que fue degradado.

La localización del área a rehabilitar permitirá la visita/participación de personas con diferentes niveles de educación promoviendo/ayudando en la conservación de manglares. La educación ambiental y la conservación de la reserva de la biósfera es una de las misiones de las instituciones asociadas al proyecto (CONANP y DUMAC), las cuales han manifestado su interés en participar en el desarrollo del potencial “parque ecológico” relacionando directamente la investigación de bosques de manglar desde el punto de vista de manejo sustentable. La implementación de esta iniciativa representa potencialmente un valor agregado a los beneficios que el proyecto puede tener a nivel local y regional desde el punto de vista puramente ecológico (funciones). Representantes de varios grupos comunitarios reconocen el beneficio del proyecto como lo refleja su participación en los trabajos iniciales de reforestación y rehabilitación hidrológica (construcción de canales- JICA), y han solicitado

abiertamente (a través de CONANP y SEMARNAT) la continuación del proyecto de rehabilitación.

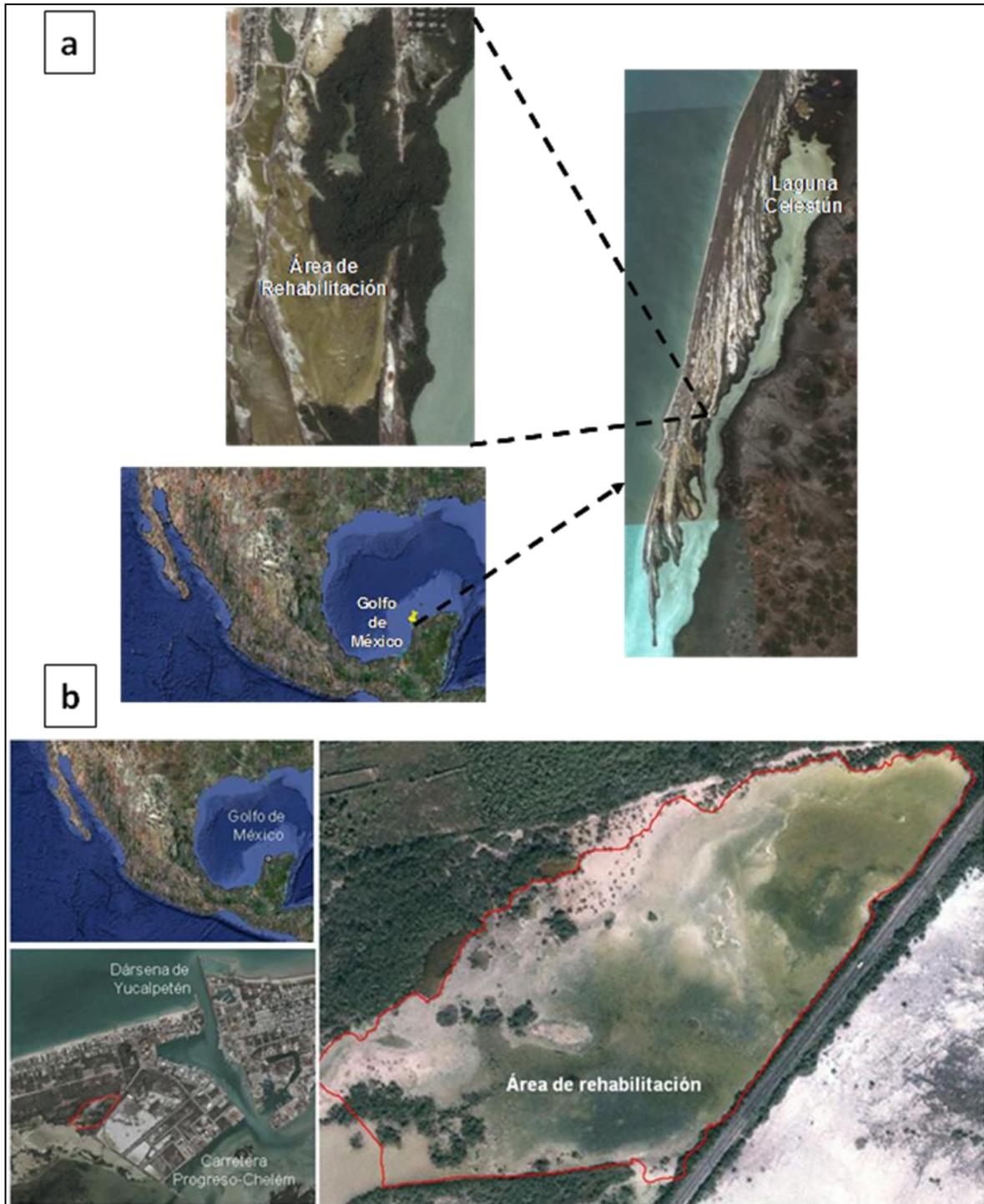


Figura 1. Localización de las áreas de rehabilitación: a) Puerto Celestún y b) Puerto Progreso (Google earth 2009).

III.2. Progreso: Por otra parte, el área a rehabilitar de puerto Progreso se encuentra localizada en el municipio de Progreso, comprendida al costado Oeste del vértice formado por el entronque de la carretera que se dirige a puerto Progreso-Mérida en la carretera Yucalpetén-Chelém (Fig. 1b). El área efectiva de rehabilitación consiste en 7.37 ha y es la superficie donde se realizaron las acciones de rehabilitación. Esta área representa aproximadamente el 7% de área de manglar en el municipio con necesidades de rehabilitación, los vértices del área a rehabilitar en coordenadas UTM en zona 16N y DATUM WGS84 son: 2354740.31, 218064.04; 2354422.06, 218064.64; 2354423.27, 218574.55 y 354744.53, 218576.36.

El área se caracteriza principalmente por sedimentos inorgánicos (“sascab”), debido a que el área se utilizó como sitio para disponer los sedimentos provenientes de los dragados del puerto de Yucalpetén. Asimismo se presenta obstrucción del flujo natural de agua proveniente de la laguna debido a la construcción de la carretera, ambas condiciones influyeron para interrumpir el hidropériodo provocando el deterioro y muerte de la vegetación de manglar existente en la zona.

IV. ANTECEDENTES DE REHABILITACIÓN EN CADA LOCALIDAD

En el área de rehabilitación en la localidad de Celestún en el año 2000 se construyeron alcantarillas para facilitar el paso de agua por debajo de la carretera, las cuales fueron insuficientes para promover la recuperación de la vegetación. En 2006 la “Japan International Cooperation Agency” (JICA), inició estudios pilotos de rehabilitación de manglares en esta área a través de programas de reforestación y excavación de manantiales para facilitar el flujo de agua subterránea hacia áreas plantadas con propágulos y plántulas de manglar, obteniéndose resultados parciales y limitados debido al efecto especial restringido de los manantiales para restablecer el hidropériodo.

En el caso del área de rehabilitación en puerto Progreso, éste ha sido de interés para su recuperación desde el año 2005. La Secretaría de Ecología en ese entonces realizó un programa de reforestación con mangle rojo a través de un método que consiste en insertar en el suelo estacas de madera y atar en ellos los propágulos; este programa fue fallido, ya que solo se pueden observar las estacas (menos del 1 % de sobrevivencia). Por otra parte desde marzo de 2008 existe un esfuerzo conjunto entre instituciones como CINVESTAV, DUMAC, CONANP, SEMARNAT, CICY, LSU y la Novena Zona Naval para rehabilitar esta área de manglar. Dichas instituciones formaron el comité núcleo para la rehabilitación de los manglares en Yucatán. Fue en octubre de 2008 cuando la SEMARNAT apoyó con un programa de empleo temporal para 22 personas, en

donde la meta era la construcción de canales, estas obras marcaron el inicio del programa en el área. En Noviembre de 2008 se dio continuidad a las acciones ya con financiamiento de la CONABIO.

V. REHABILITACION DE LOS MANGLARES EN CELESTÚN

V.1 Caracterización ambiental del sitio: Celestún

Para realizar la caracterización ambiental de la zona de rehabilitación primero se procedió a zonificar el área de trabajo en 12 sitios (Fig. 2), diez de rehabilitación (1 a 10) y dos de referencia (R-1 y R-2). En estos últimos se hizo la medición de variables estructurales de árboles adultos, regeneración potencial, así como la toma de agua intersticial, mientras que en cada sitio de rehabilitación se tomaron núcleos de sedimentos, muestras de agua para análisis de nutrientes, y datos de salinidad intersticial como parte de la información del tiempo inicial y como referencia para determinar el éxito de las acciones de rehabilitación.

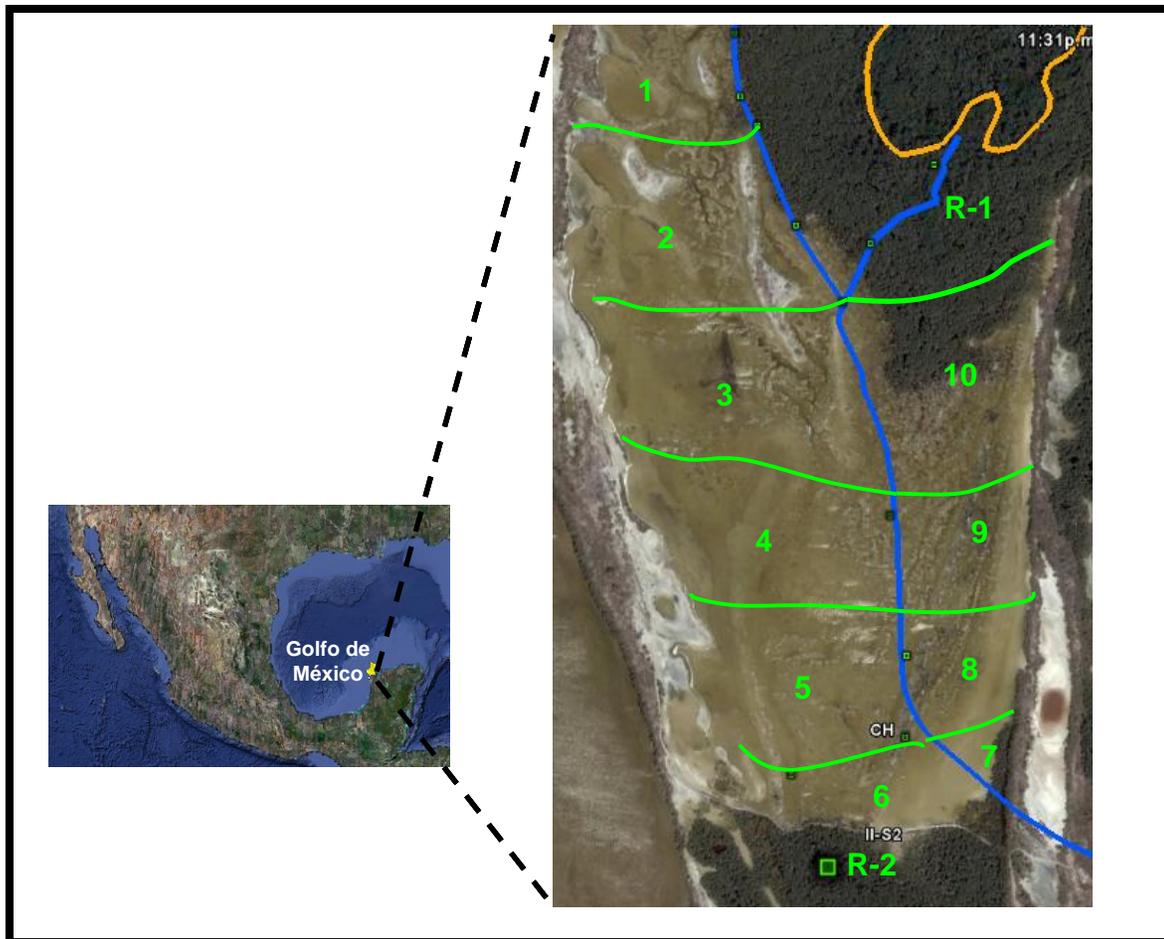


Figura 2. Ubicación de los sitios en los que se encuentra dividida la zona de rehabilitación en puerto Celestún.

Estructura forestal: Para llevar a cabo la determinación de la estructura de árboles adultos, en cada uno de los sitios se establecieron dos parcelas permanentes (10 X 10 m) siguiendo las especificaciones estándar de estudios forestales. Las variables medidas en cada una de las parcelas fueron: diámetro a la altura del pecho (DAP), el cual proporciona información cuantitativa sobre la estructura de la masa arbórea, con esta medida se calculó el área basal. Para obtener esta medida se utilizó una cinta diamétrica tomándolo a la altura del pecho del observador. También se determinó la altura de cada árbol y la densidad. La medición de estas variables se realizó en los sitios de referencia (R-1 y R-2), debido a que solo ahí hay presencia de árboles de manglar vivos (Fig. 3).



Figura 3. Medición de las variables estructurales del manglar en los sitios de referencia de Celestún.

Regeneración potencial: Para llevar a cabo la descripción de plántulas y juveniles, se establecieron parcelas por duplicado de 5 X 5 m para la medición de juveniles, dentro de éstas parcelas se establecieron 2 parcelas de 1 X 1 m de forma aleatoria para plántulas. La medición de las plántulas se realizó en los sitios de referencia (R-1 y R-2), debido a que solo ahí hay presencia de plántulas de manglar.

Adicionalmente se establecieron parcelas de 4 x 4 m en áreas donde se observó la regeneración natural de plántulas en sitios dentro del área de rehabilitación (Fig. 4).



Figura 4. Medición de plántulas de manglar en los sitios de referencia.

Salinidad Intersticial: En cada uno de los sitios especificados para la zona de rehabilitación se tomaron muestras de agua intersticial a 40 cm de profundidad para medir la salinidad usando una sonda multiparamétrica YSI-30 (Fig. 5).



Figura 5. Colecta de agua intersticial para la medición de la salinidad.

Sedimentos: En cada uno de los sitios (10) del área de rehabilitación así como en los sitios de referencia (2), se tomaron 2 muestras de sedimento con ayuda de un nucleador de 6 cm de diámetro y 40 cm de largo. A las muestras se les llevó a cabo la medición de densidad aparente (bulk density), contenido de materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo total). El análisis de sedimentos se llevó a cabo en laboratorios del CINVESTAV, las muestras fueron tomadas al inicio y al final de las acciones de rehabilitación (Fig. 6).



Figura 6. Toma de núcleos para la determinación de las características del sedimento.

V.2 Resultados de la caracterización: Celestún

Estructura forestal: De acuerdo a las variables estructurales de la vegetación, el sitio de referencia-1 (R-1) presentó mejor desarrollo estructural que el sitio de referencia-2 (R-2) de acuerdo al índice de complejidad (Fig. 7). La especie dominante fue *R. mangle*, indicando que es una zona con mayor inundación promedio y flujo de agua, mientras que en la R-2 la especie dominante fue *A. germinans*, indicando que probablemente la salinidad intersticial es mayor en este sitio de referencia. En los demás sitios (sitio 1 al sitio 10), no se llevaron a cabo mediciones de árboles adultos debido a que no hay individuos vivos.

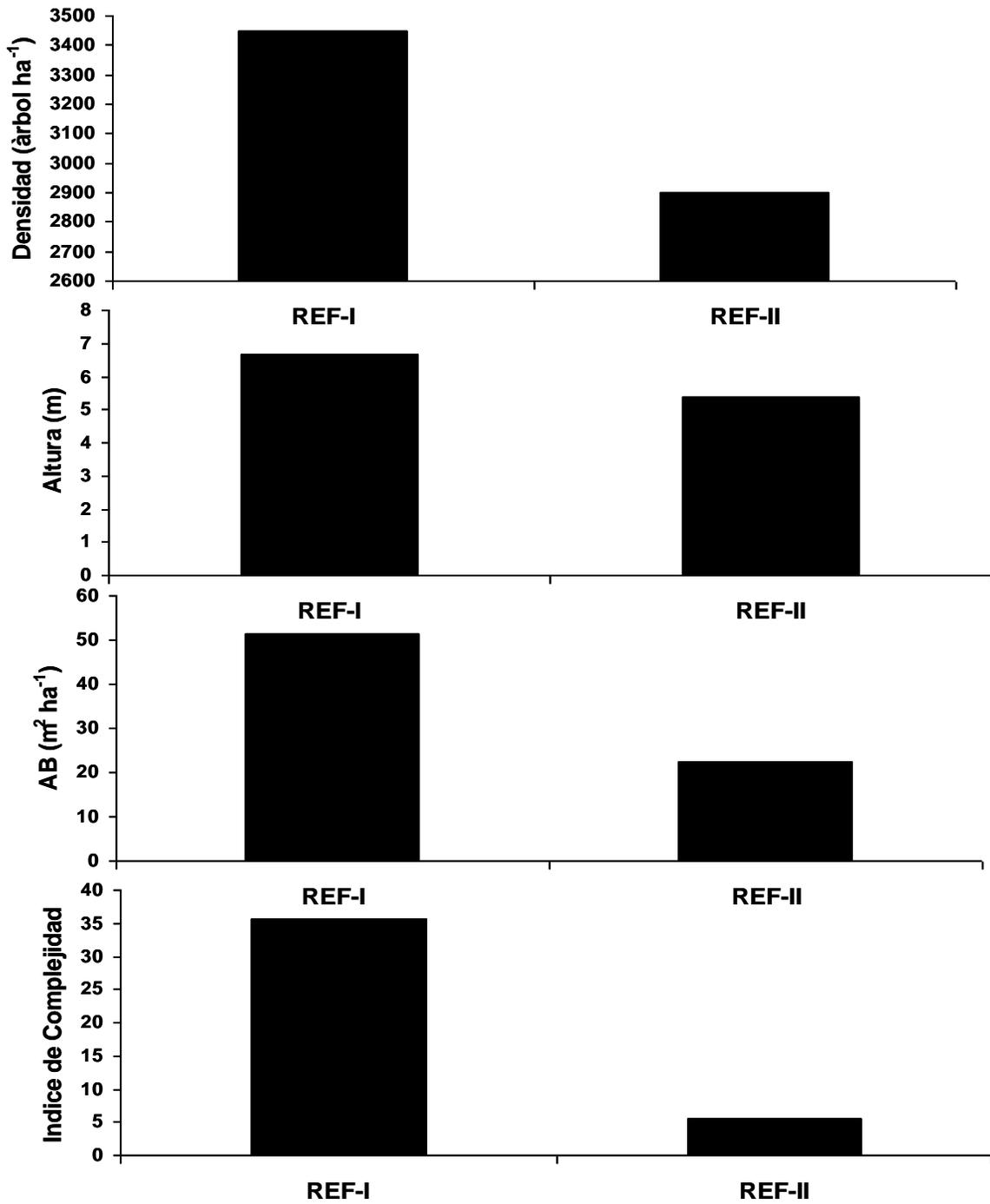


Figura 7. Variables estructurales de los sitios de referencia 1 y 2 de la zona de rehabilitación de la localidad de puerto Celestún.

Salinidad Intersticial: La salinidad promedio de la zona de rehabilitación fue de 98 g/kg, siendo el sitio 6 donde se registró la salinidad más alta (118.8 g/kg), mientras que en los sitios de referencia la salinidad promedio fue de 61 g/kg, siendo en el R-1 donde se registró la salinidad más baja (59.2 g/kg) (Fig. 8). La salinidad en altas concentraciones es un estresor que afecta el establecimiento y crecimiento de individuos, por lo que en los sitios 1-10 no se observó al inicio del proyecto la presencia de árboles adultos y plántulas de manglar vivos. De acuerdo a estos resultados, una meta de la rehabilitación debería ser al menos que la salinidad alcanzara los valores promedio de los sitios de referencia en un período de 2 años.

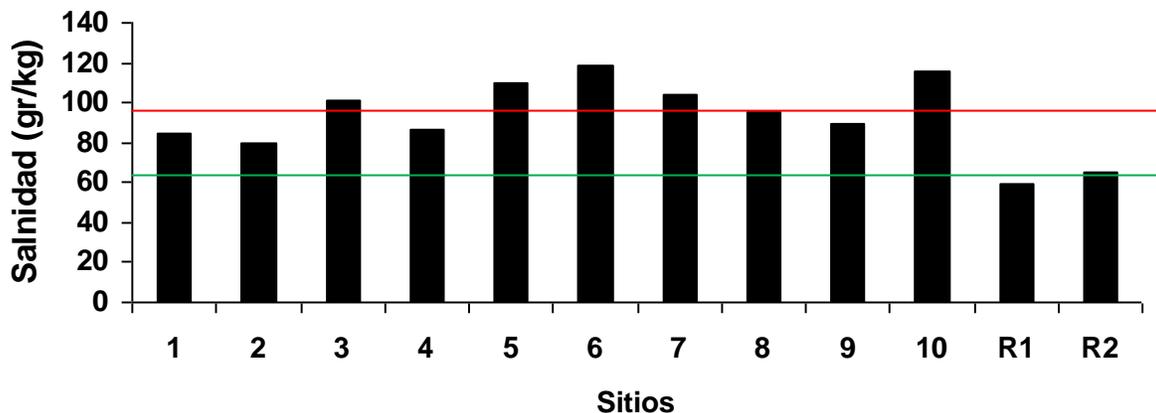


Figura 8. Salinidad intersticial de los sitios en la zona de rehabilitación de puerto Celestún. Las líneas indican la salinidad promedio de los sitios de referencia (verde) y con acciones de rehabilitación (rojo).

Potencial Redox y pH: La biogeoquímica, disponibilidad de nutrientes y estresores en los sedimentos de manglar es en gran medida dependiente del potencial redox, por lo que ésta variable podría ser un indicador de la recuperación de los sedimentos en estos humedales, el cual a su vez depende de la dinámica de inundación que se espera rehabilitar con las acciones que se propusieron en este proyecto. En relación a los valores iniciales del potencial redox se presentaron en promedio negativos, indicando que son suelos altamente reducidos en los sitios 5 (-390 Mv) y 6 (-385 Mv). Sin embargo, los valores observados en los sitios de referencia son menores (-100 Mv) con respecto a los demás sitios (Fig. 9). En lo que respecta al pH, en el sitio 7 se registro el pH más elevado respecto a los demás sitios (7.3), seguido del sitio 4 y 8, el sitio 6 presento el menor pH con 6.8 (Fig. 9).

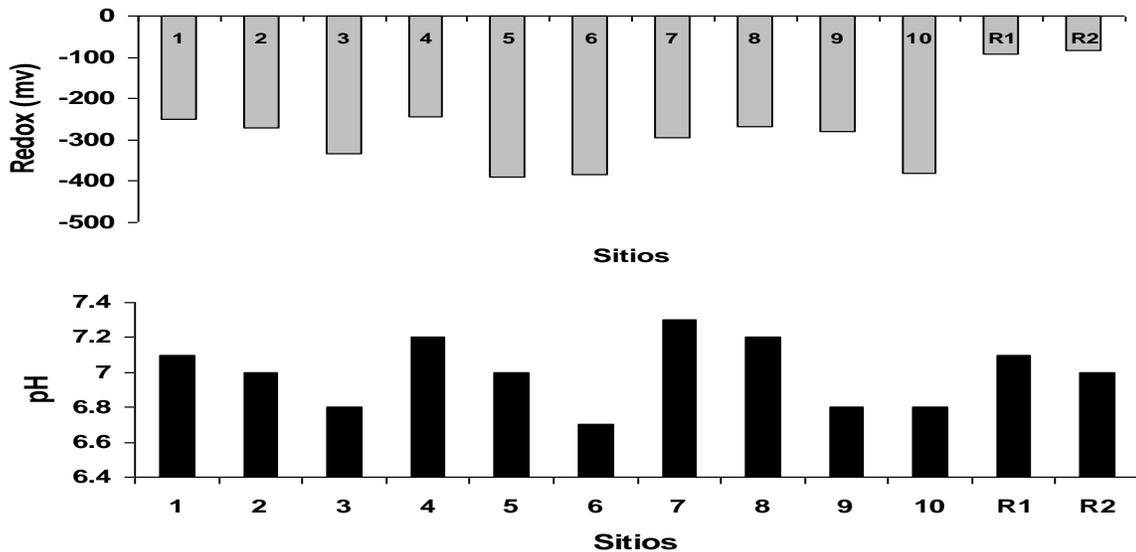


Figura 9. Potencial Redox y pH de los sitios en la zona de rehabilitación de puerto Celestún.

Materia orgánica y densidad del suelo: Los sitios de rehabilitación 1, 2, 4, 5 y 8 presentaron menores porcentajes de materia orgánica (27.2 a 35.8 %) respecto a los sitios de referencia (>45 %). En algunos sitios de rehabilitación (sitio 10) el alto contenido de M.O., (>50%) probablemente se asocia a que en estos sitios el manglar estaba bien desarrollado estructuralmente como lo demuestra la densidad de árboles muertos (Fig. 10).

La formación de suelo en los ecosistemas de manglar es una combinación de procesos ecológicos incluyendo la producción, exportación y descomposición de materia orgánica. La dinámica de la materia orgánica en sedimentos está fuertemente relacionada con los aportes (internos y externos) a los que están sujetos estos ecosistemas, y que en este caso muy probablemente sólo sean fuentes internas (autóctonas).

La densidad de los sedimentos está relacionada con el contenido de materia orgánica, por lo que en los sitios donde se observaron altos porcentajes se registró una densidad aparente menor como los sitios R-5 y R-8 de rehabilitación, que presentaron mayores densidades (0.32 gr cm^{-3}) (Fig. 10).

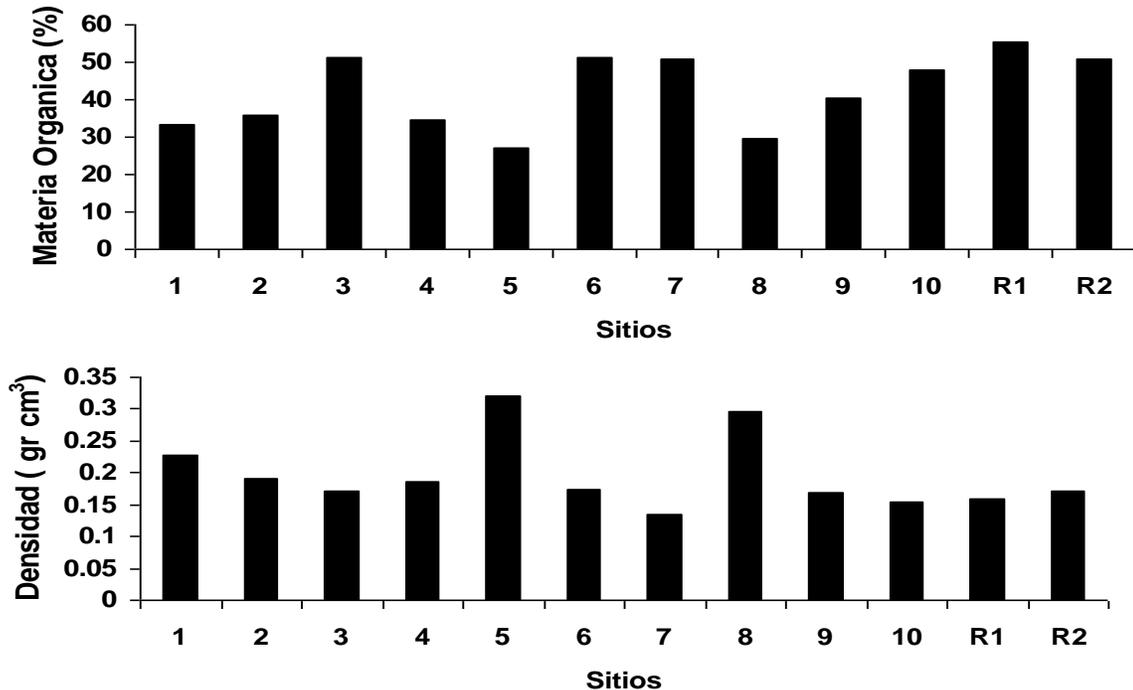


Figura 10. Contenido de materia orgánica y densidad del suelo del manglar de los sitios en la zona de rehabilitación de puerto Celestún.

Nitrógeno total del sedimento: En general el contenido de NT de los sedimentos de los sitios de rehabilitación es <1%, mientras que en los sitios de referencia el contenido de NT es >1%. El sitio R-2 presentó el mayor porcentaje de NT (1.55%), mientras que el sitio de rehabilitación 8 presentó el menor (0.73%) (Fig. 11). Existe una relación directa de la concentración de materia orgánica con la disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, los cuales se vuelven disponibles para la planta a través de los procesos de descomposición y mineralización. En los manglares sujetos de estudio, las fuentes externas de nutrientes provienen probablemente de los aportes de agua de los manantiales (N), y de las aves que utilizan el humedal (P).

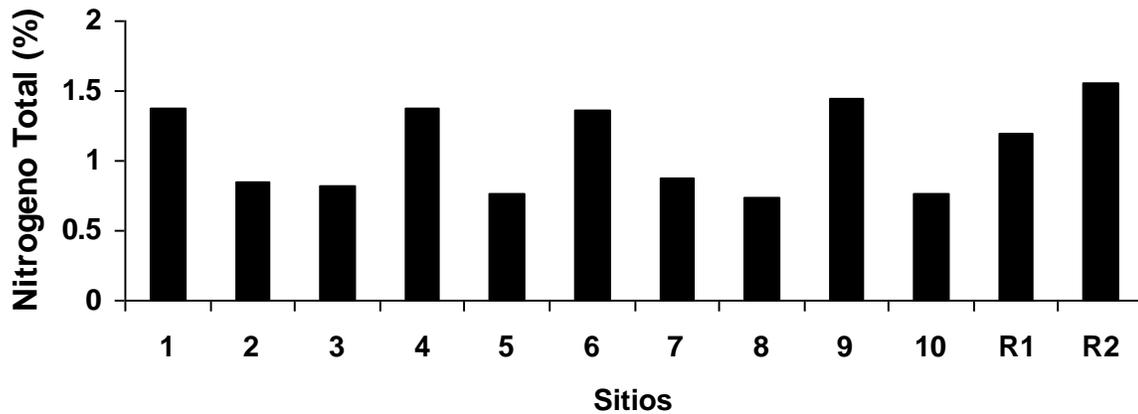


Figura 11. Concentración de nitrógeno total en el suelo de manglar de los sitios de puerto Celestún.

Fósforo total del sedimento: En la mayoría de los sitios de rehabilitación el contenido de PT es $<0.125\%$, sólo en algunos sitios es mayor (sitio 7) (Fig. 12), sugiriendo que podría ser un sitio para el establecimiento de centros de dispersión.

Los bosques de manglar asociados con sedimentos carbonatados, donde el aporte de nutrientes alóctonos es mayor para nitrógeno y bajo para fósforo, este último podría ser limitante para el desarrollo y recuperación de los manglares en la zona de rehabilitación.

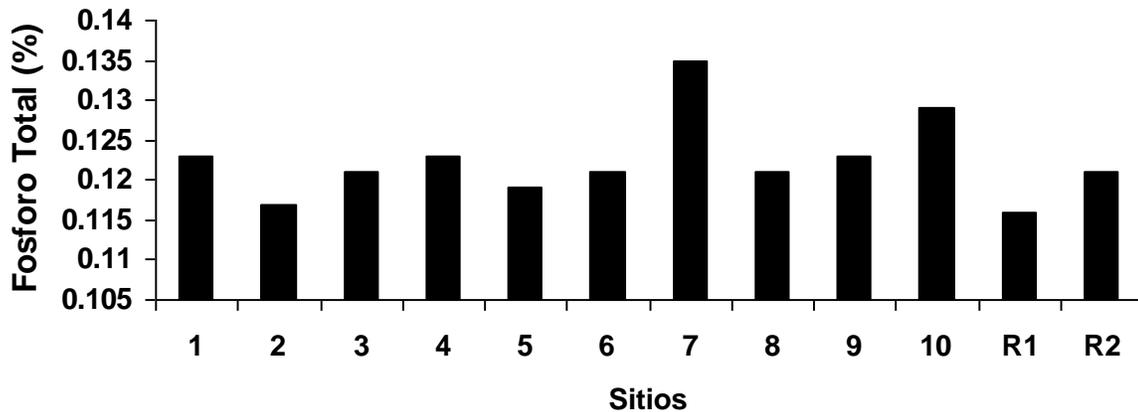


Figura 12. Concentración de fósforo total en el suelo de manglar de los sitios de puerto Celestún.

Nutrientes inorgánicos en agua intersticial: La mayor concentración de nitritos se observó en el sitio 2 ($8.9 \mu\text{M}$), seguido del sitio 8 ($3.1 \mu\text{M l}^{-1}$). En los sitios de referencia se registraron concentraciones menores con respecto a lo demás sitios (R-1: $0.13 \mu\text{M}$ y R-2: $0.04 \mu\text{M}$) (Fig. 13). En el sitio 5 ($25.8 \mu\text{M}$) se registró la mayor concentración de nitratos seguido del sitio 8 ($18.9 \mu\text{M}$).

El amonio es el nutriente dominante, sugiriendo que las condiciones ambientales son favorables para estimular los procesos de descomposición de materia orgánica, propiciando condiciones anóxicas identificadas por el olor a azufre, observándose las mayores concentraciones de amonio en el sitio 7 con 184 μM (Fig. 13).

Los nutrientes inorgánicos disueltos del agua intersticial son un referente de los procesos que se suscitan en el sedimento, por ejemplo, el ciclo del nitrógeno. La concentración y las variaciones de los nutrientes inorgánicos permiten explicar la conexión que hay entre las variables fisicoquímicas del sedimento y la hidrología.

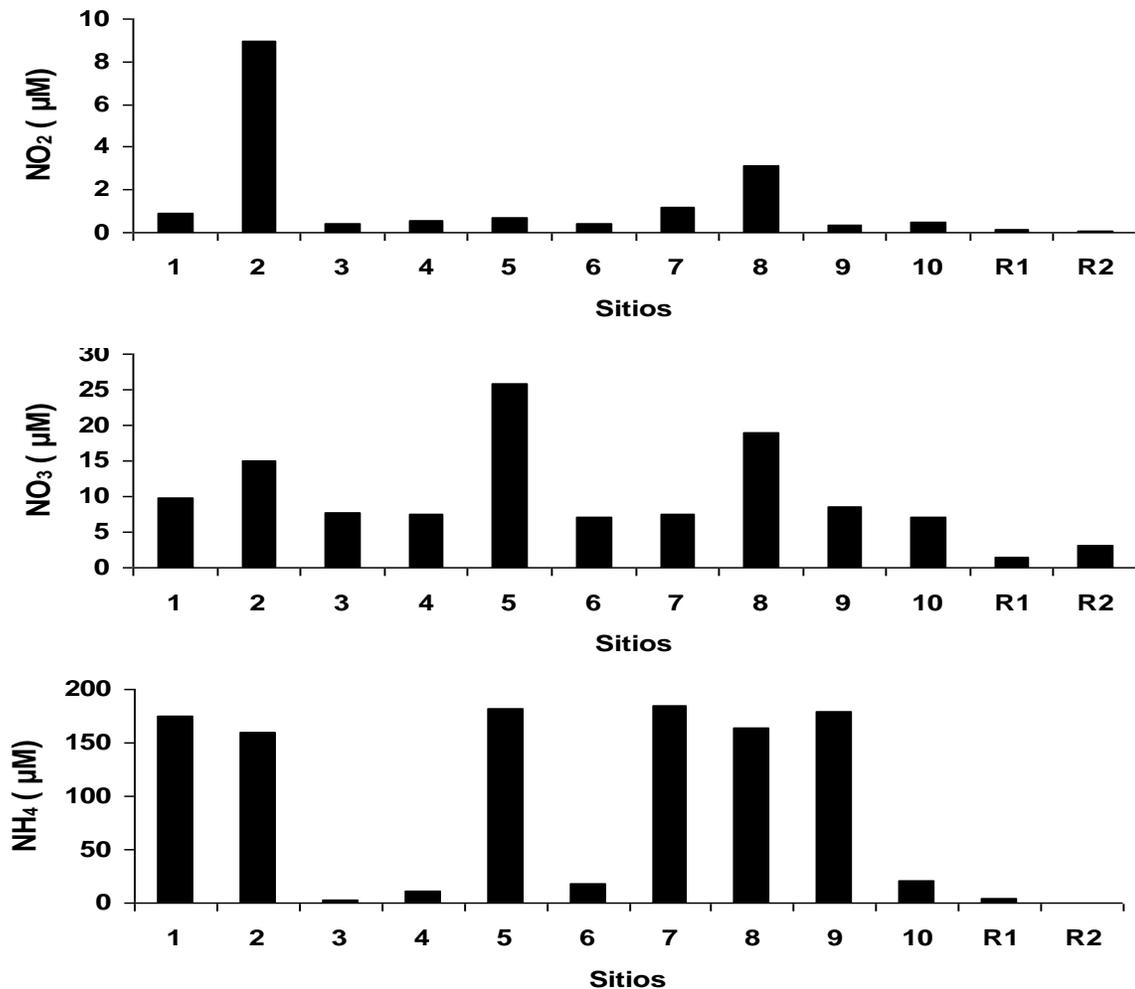


Figura 13. Nitritos, nitratos y amonio en agua intersticial de los sitios de la zona de rehabilitación.

En el caso del fosfato, los valores observados fueron en general bajos, probablemente explicados a través de los procesos de precipitación o asimilación en los sedimentos, ya que el sustrato carbonatado de la zona favorece estos procesos en el caso del fósforo. En el sitio 5 (29.3 μM) se

observó las mayores concentraciones respecto a los demás sitios, los menores valores se registraron en el sitio 4 (0.27 μM) (Fig. 14).

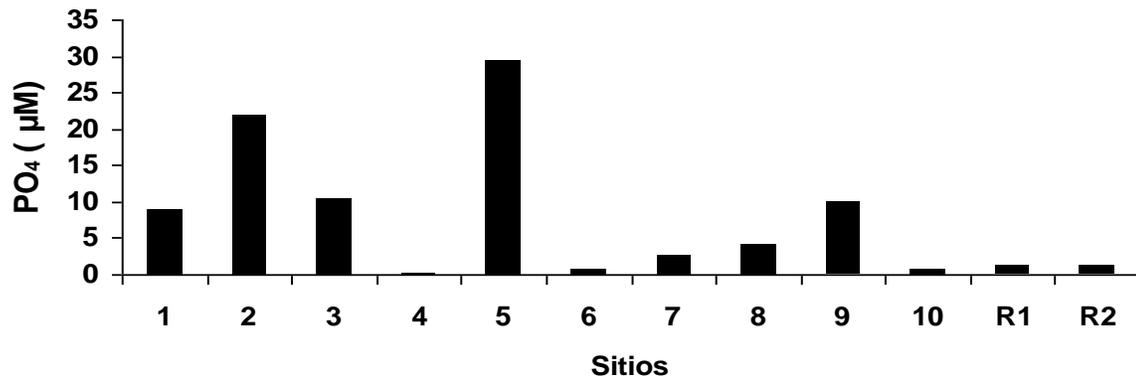


Figura 14. Fosfatos en agua intersticial de los sitios de la zona de rehabilitación de puerto Celestún.

V.3 Acciones de rehabilitación y programa de monitoreo: Celestún

En la zona de rehabilitación de puerto Celestún se establecieron 3 transectos ubicándolo respecto al canal principal para determinar el efecto del mismo. En cada uno de los puntos establecidos dentro de los transectos se llevó a cabo la medición de salinidad (muestreos temporales), ya que esta fue la variable principal que se buscó recuperar durante el período de duración del proyecto. (Fig. 15A).

Por otra parte en la Figura 15B se observan los puntos específicos donde se toman mediciones de salinidad, temperatura y nutrientes en agua intersticial para los sitios en la cual se encuentra dividido toda la zona.

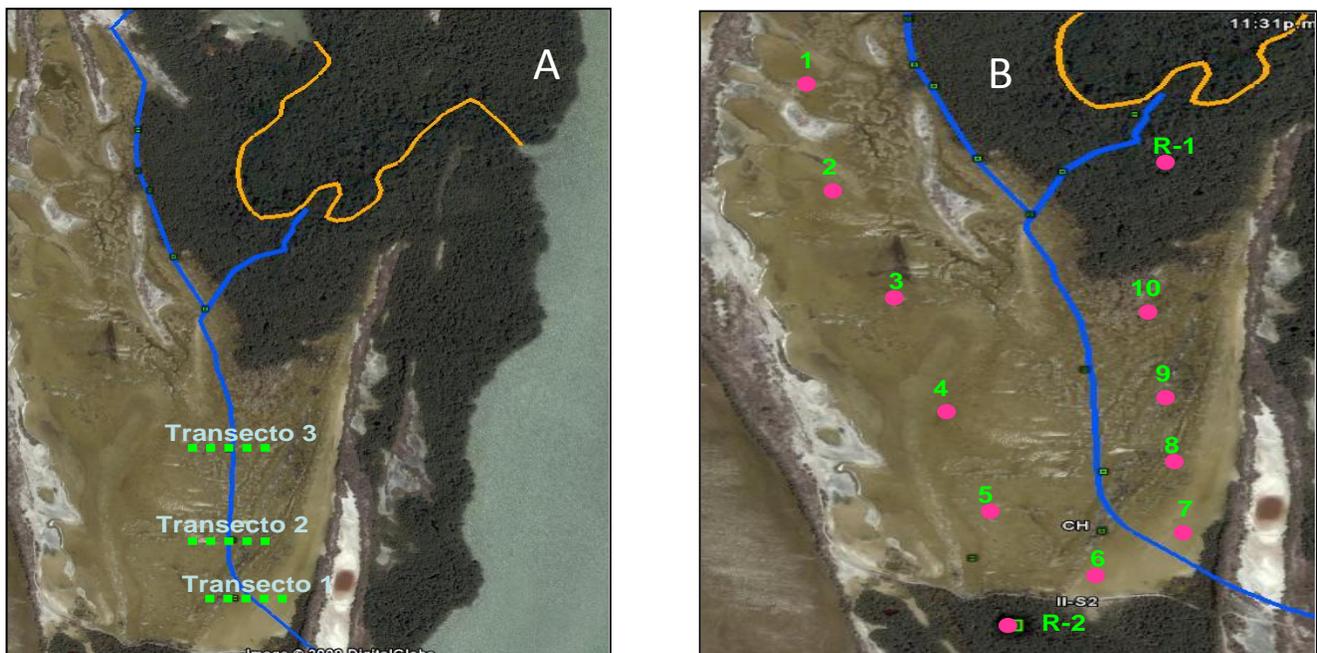


Figura 15. Ubicación de los transectos (A) para el monitoreo de las condiciones del agua intersticial respecto a canal principal, y sitios de monitoreo de condiciones ambientales para la zona en general (B) de puerto Celestún.

Condicionamiento de áreas como sitios de dispersión:

Para llevar a cabo el acondicionamiento de las áreas se realizaron las siguientes acciones:

1-Construcción de canales para reintroducir agua a la zona de rehabilitación:

En el sitio de restauración de la localidad de puerto Celestún, se han construido 1200 metros lineales de canal principal con un ancho promedio de 3 m y 60 cm de profundidad (Fig. 17), lo cual representa un poco más del doble comprometido en el proyecto. Adicionalmente, se han

construido alrededor de 1000 metros de canales secundarios de 1m de ancho y 40 cm desde profundidad. A estos canales se les ha dado mantenimiento al menos dos veces durante el proyecto.

El trazado del canal principal (línea azul) y las áreas de los secundarios (áreas blancas), se pueden observar en la figura 16.

Como otra obra de rehabilitación se llevó a cabo la apertura de un pozo en la región más al sur de la zona de rehabilitación, el cual presenta una profundidad de 5 metros.



Figura 16. Ubicación del canal principal (color azul) y canales secundarios (color blanco), así como del pozo (círculo rojo).

2- Selección de sitios y de especies nativas. Colecta de propágulos de las zonas aledañas al sitio de rehabilitación.

Ya acabadas las obras de rehabilitación se procedió a coleccionar propágulos para poder hacer la reforestación en los sitios de dispersión. La colecta de propágulos se llevó a cabo en agosto-octubre 2009 debido a que es la fecha en la que están disponibles éstos, y provienen de los sitios de referencia (R-1 y R-2) de la zona de rehabilitación (Fig. 15).

VI. RESULTADO DEL MONITOREO: CELESTÚN

VI.1 Variables ambientales

Salinidad Intersticial Transectos: Se establecieron 3 transectos para observar el efecto del canal a diferentes distancias, en las que cada punto estaba alejado uno del otro 20m. Para observar los cambios de salinidad en toda la zona se establecieron 10 sitios de la zona de rehabilitación, además de 2 sitios de referencia que se encuentran en buenas condiciones y que se localizan aledaños a la zona a recuperar (Fig. 15)

Salinidad transecto 1: Los puntos más alejados al canal presentaron las salinidades más altas durante todo el periodo de muestreo. En el tiempo-1 se registró la salinidad más alta en el punto A (70.5 gr/kg), las salinidades más bajas se registraron en los puntos cercanos al canal (punto C = 34.4 gr/kg) y punto F (32.2 gr/kg) (Fig. 17). La salinidad intersticial disminuye en el tiempo 4 aun en los puntos más retirados del canal hasta salinidades de 21.1 gr/kg (punto C). Sin embargo, la salinidad aumenta al siguiente periodo de muestreo debido a las características climáticas de la región. En la época de lluvias disminuye la salinidad debido al agua dulce de la precipitación y a que el agua de la laguna que entra por los canales construidos es de menor salinidad. Sin embargo, en época de secas debido a que la evaporación supera la precipitación se incrementa la salinidad intersticial. En el último muestreo (T-9) la salinidad disminuye en todos los puntos del transecto. En los puntos más retirados al canal donde la salinidad superaba los 70 gr/kg (punto A) disminuyó a 33 gr/kg (Fig. 17).

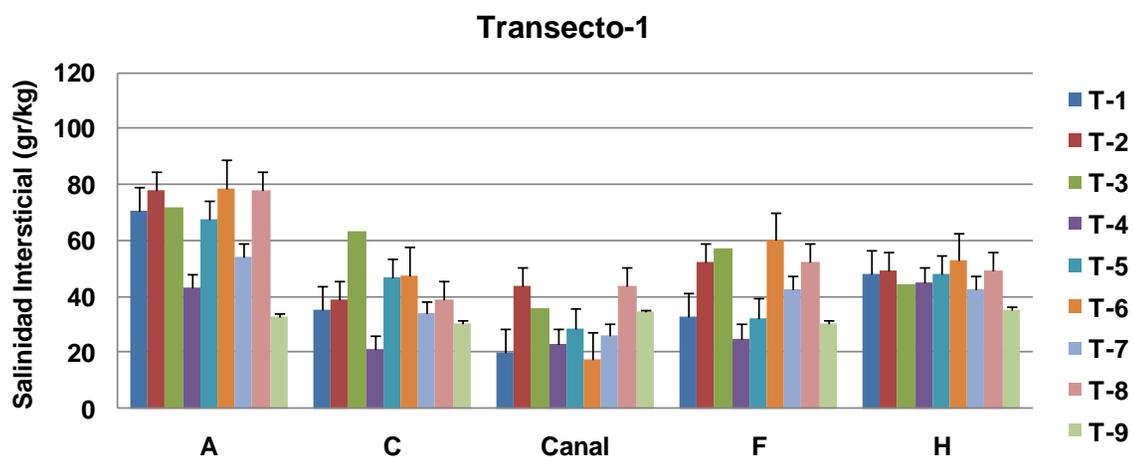


Figura 17. Cambios temporales de salinidad intersticial en el Transecto 1 de la zona de rehabilitación de la localidad de Celestún, donde T-1 a T-9 corresponde a los muestreos del monitoreo de Celestún.

Salinidad transecto 2. En el primer muestreo se registraron valores promedio de hasta 91 gr/kg (punto K), y menores valores cerca del canal (39.9 gr/kg, punto E) (Fig. 18). La salinidad disminuye en el tiempo 4 correspondiente a la temporada de lluvias 2009 (ejemplo, punto B = 51.4 gr/kg). La salinidad vuelve a incrementarse en los siguientes muestreos hasta que en la última toma de datos esta variable desciende en todos los puntos del transecto (Fig. 18).

Estos resultados sugieren por una parte que la fuente de agua (canal) a la zona de rehabilitación tiene un efecto espacial, generando un gradiente de menor salinidad cerca del canal y aumentando a medida que se aleja de éste, y por otra que la intensidad de su impacto para restablecer las condiciones de salinidad intersticial del sitio siguen un patrón temporal, en el que la época de lluvias favorece un marcado decremento de las concentraciones de esta variable, y aumentando en la época de secas.

El seguimiento de esta variable debería de hacerse por al menos dos años más con frecuencia de muestreo cuatrimestral. Los resultados indicarían por una parte el intervalo en que esta característica varía, y por otra parte, si la disminución de la salinidad se mantiene lo suficiente para restablecer condiciones que favorezcan la regeneración natural del manglar.

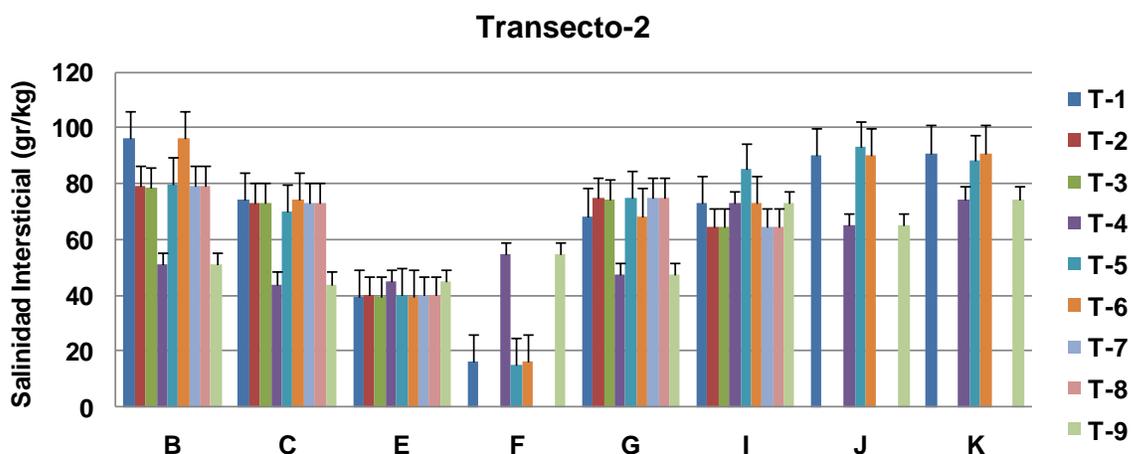


Figura 18. Cambios temporales de salinidad intersticial en el Transecto 2 de la zona de rehabilitación de la localidad de Celestún, donde T-1 a T-9 corresponde a los muestreos del monitoreo de Celestún.

Salinidad transecto 3. En este transecto se observaron las salinidades más altas en todos los puntos se realizaron los muestreos del monitoreo respecto a los transectos 1 y 2. Los puntos más retirados al canal presentaron las salinidades más altas (punto A = 100 gr/kg; punto R=106 gr/kg) durante el primer periodo de muestreo (Fig. 19). La salinidad disminuye en el tiempo 4 que corresponde a la temporada de lluvias, sin embargo, las salinidades siguen siendo altas, registrándose la salinidad promedio más baja en el punto K (55.6 gr/kg) (Fig. 19). La salinidad

aumenta en todos los puntos en el tiempo 6 -el cual corresponde al mes de diciembre 2009- hasta valores de 100 gr/kg (punto A, C, G, Ñ y P). La salinidad en el último periodo de muestreo disminuyó en todos los puntos, sin embargo, el valor promedio siguen siendo altos (>70 gr/kg). Para este período de muestreo el valor más bajo se registró en el punto "M" (45.6 gr/kg) (Fig. 19).

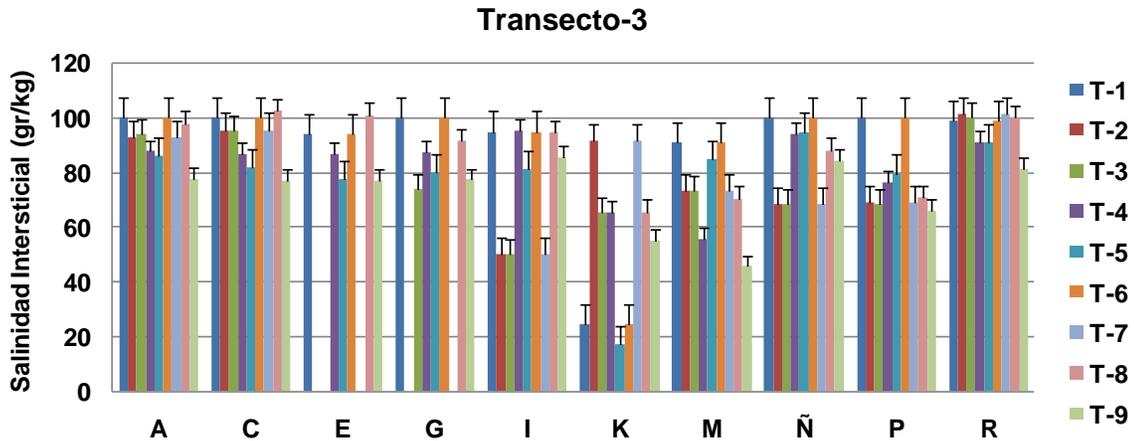


Figura 19. Cambios temporales de salinidad intersticial en el Transecto 3 de la zona de rehabilitación de la localidad de Celestún, donde T-1 a T-9 corresponde a los muestreos del monitoreo de Celestún.

Comparando los 3 transectos, el transecto 1 presentó las menores salinidades durante el período de muestreo, registrándose la media más alta en el mes de Abril (T-3, 52 gr/kg), mientras que el valor más bajo se presentó en el último período de muestreo (Fig. 20). En el transecto 2 la salinidad aumenta con respecto al transecto 1 registrándose la media más alta durante el mes de octubre (T-5, 69 gr/kg). En el último período de muestreo la salinidad disminuye (55 gr/kg) (Fig. 20). Con respecto al transecto 3, este presentó las salinidades más altas durante todo el período de muestreo.

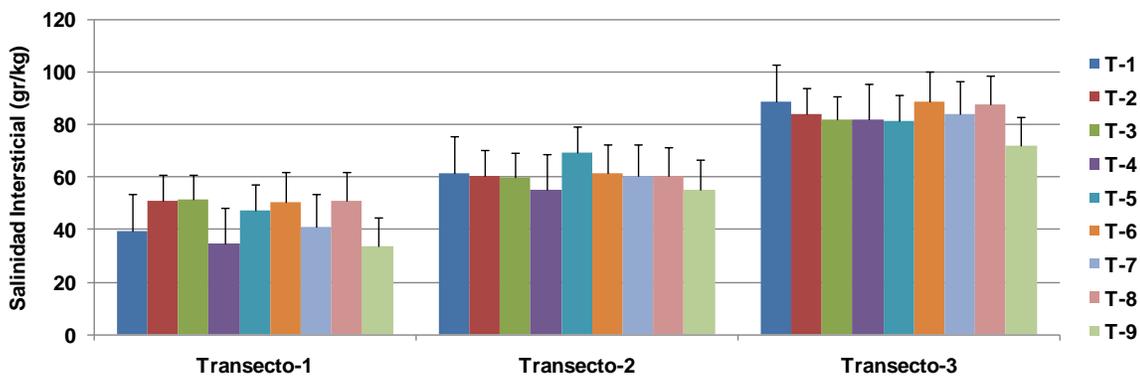


Figura 20. Cambios de la salinidad intersticial de los 3 transectos, donde T-1 a T-9 son los muestreos del monitoreo de Celestún.

Salinidad intersticial de los 10 sitios de la zona de rehabilitación: La salinidad en todos los sitios de muestreo fue mayor en el T-0 (Tiempo cero), debido a que es la medición que se realizó antes de la apertura de los canales. Las salinidades más altas que se registraron fueron en los sitios 3 (101.4 gr/kg), 6 (118.8 gr/kg) y 10 (108.2 gr/kg), mientras que la menor salinidad que se observó en la zona de rehabilitación fue en el sitio 5 (63.9 gr/kg). Las salinidades registradas al inicio del proyecto de rehabilitación indican que esta era la razón principal de la muerte del manglar, ya que se ha observado que el manglar solo puede tolerar salinidades >60 gr/kg por periodos cortos de tiempo.

De los sitios de referencia el R-1 presentó la menor salinidad (59.2 gr/kg). En el siguiente período (Tiempo-1) de muestreo la salinidad disminuye en la mayoría de los sitios debido a que el muestreo se llevó a cabo en época de lluvias, observándose la menor salinidad en el sitio 7 (29.2 gr/kg) y la mayor salinidad en el sitio 9 (140 gr/kg). La salinidad se incrementa en el siguiente período de muestreo hasta 114.7 gr/kg (punto 10).

La salinidad es un indicador de la condición del sitio, la cual influye en la zonación y en el grado de desarrollo de estos ecosistemas. Cuando la salinidad intersticial es superior a 70 g/kg provoca disminución en el desarrollo del manglar o muerte de este ecosistema, lo que se ve reflejado en el sitio de rehabilitación debido a que no se observaron plántulas en la zona por el estrés de salinidad del sitio.

En el último periodo de muestreo la salinidad disminuyó en todos los sitios a consecuencia de las obras, indicando el efecto de la apertura de canales ya que la salinidad más alta se encontró en el sitio 10 (63.45 gr/kg) el cual había presentado salinidades >100 gr/kg. El sitio 4 presentó la salinidad más baja (29.5 gr/kg) con respecto a los demás sitios (Figs. 21 y 22).

Los sitios de referencia presentaron valores entre 30.5 gr/kg (R-1) y 76.5 gr/kg (R-2). Sin embargo, a pesar de presentar salinidades altas el buen desarrollo estructural de la vegetación registrado, es probable que se asocie al tipo de hidroperiodo, en el que hay flujo de agua, inundación y sequía por periodos frecuentes de tiempo. Este tipo de hidroperiodo no se presentó así en la zona de rehabilitación, ya que en esta, antes de las obras de rehabilitación, el sitio permanecía por largos periodos de tiempo (meses) inundado o seco. Los síntomas de recuperación del manglar observados durante el proyecto indican que la apertura de canales tuvo un efecto positivo en la zona de rehabilitación, ya que la salinidad disminuyó y el hidroperiodo cambio.

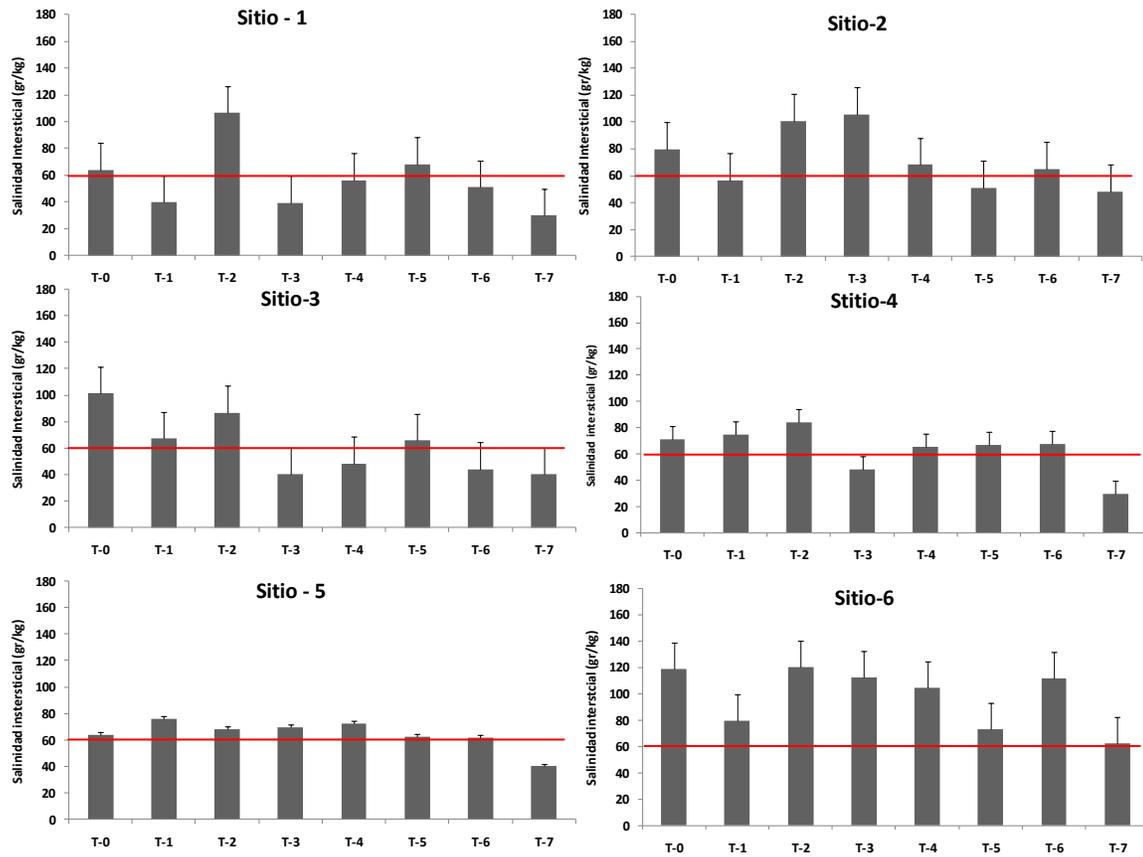


Figura 21. Cambio de la salinidad intersticial de los sitios rehabilitación, donde T-0 a T-7 corresponden a los muestreos del monitoreo de Celestún. La línea roja representa el nivel de referencia al que se aspiraba al final del proyecto.

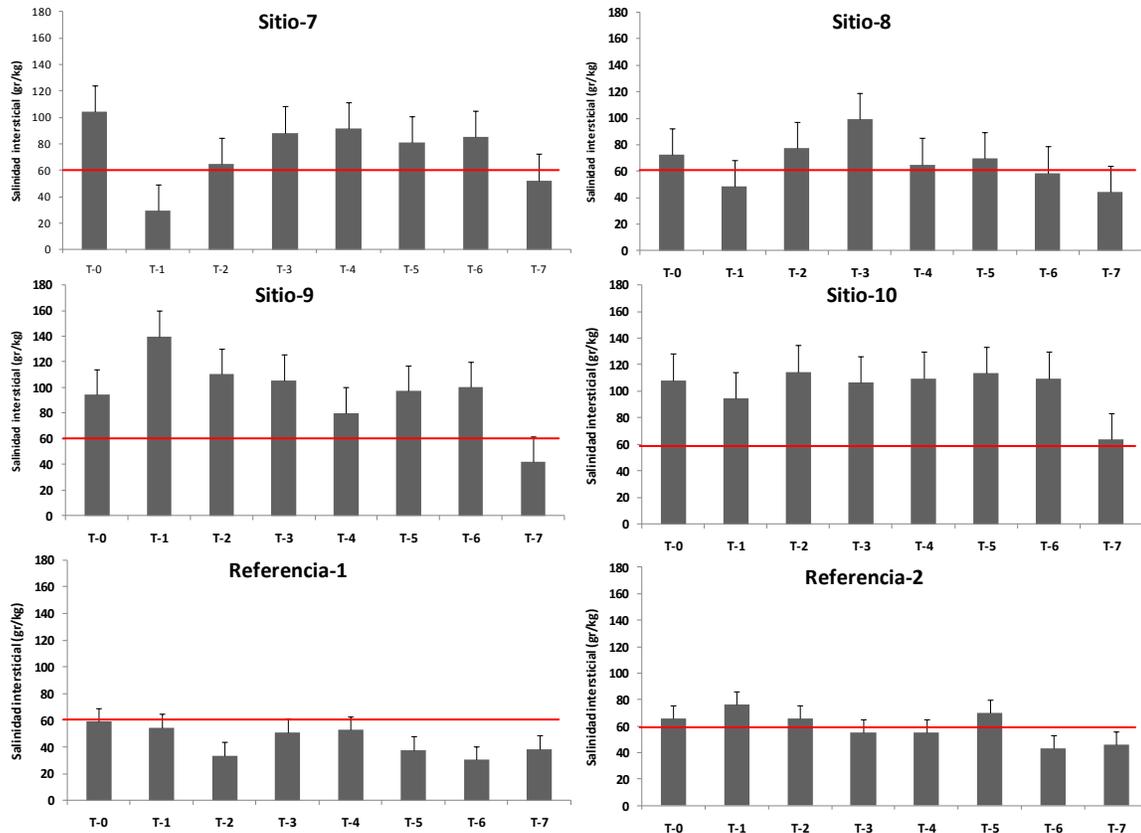


Figura 22. Cambio de la salinidad intersticial de los sitios rehabilitación, donde T-0 a T-7 corresponden a los muestreos del monitoreo de Celestún. La línea roja representa el nivel de referencia al que se aspiraba al final del proyecto.

Salinidad asociada al Pozo: Para determinar el efecto de construir pozos artificiales como medida de reducir la salinidad, y simulando el comportamiento de un manglar de peten, se monitorearon los pozos estableciéndose 2 transectos de salinidad (Fig. 23).

En el primer período de muestreo las salinidades más bajas se presentaron en los puntos cercanos a la fuente de agua (pozo) en ambos transectos (punto 1-A 5.3 gr/kg y punto 2-A 7.5 gr/kg). Los valores más altos se registraron en los puntos más retirados 1-D (80 gr/kg) y 2-D (80 gr/kg) (Fig. 23). Para el siguiente periodo de muestreo la salinidad incrementa en el transecto-2 observándose valores de hasta 101.6 gr/kg (punto 2-D), en el transecto-1 la salinidad más alta se presentó en el punto 1-D (75.7 gr/kg). En el último muestreo la salinidad presentó valores >70 gr/kg (Fig. 23). La concentración de sal siguió siendo alta para el establecimiento de plántulas de manglar, por lo que la apertura de pozos no presentó el éxito esperado, y probablemente para el sitio no sea una acción recomendada de rehabilitación.

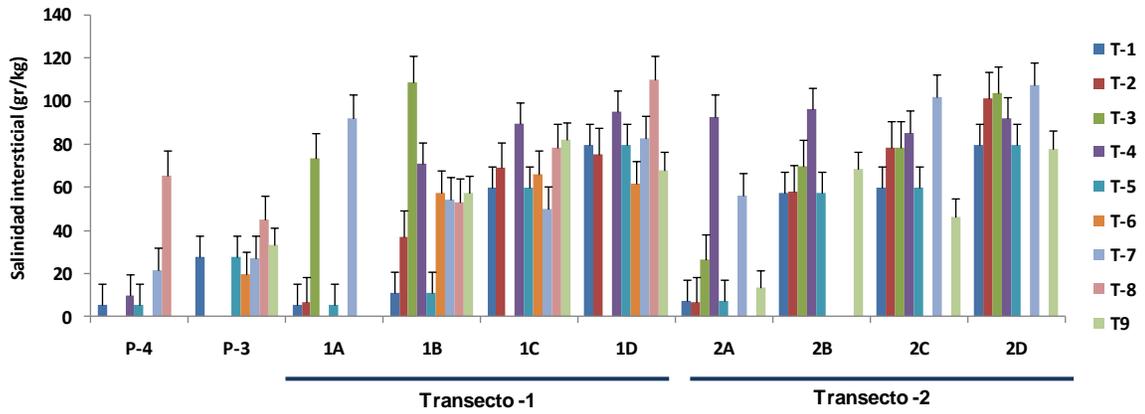


Figura 23. Cambios de la salinidad intersticial de los transectos para identificar el efecto de los pozos. Donde T-1 a T-9 corresponde los muestreos del monitoreo. P-4= es el pozo 4 y P-3= es el pozo 3 de Celestún.

VI.2 Centros de Dispersión: Para llevar a cabo la experimentación en los sitios de dispersión, se establecieron áreas (10) de 5 x 5 m, donde las condiciones del sedimento eran favorables y la hidrología se había visto favorecida con la apertura del canal principal y los secundarios. Se sembraron plántulas y juveniles de las 3 especies, estando distribuidas en 10 juveniles de *L. racemosa*, 20 plántulas de *A. germinans* y 20 de *R. mangle* (Fig. 24). Esto se realizó a finales de la época de lluvias de 2009 (Noviembre).

Después de 6 meses se vio que todos los individuos murieron, por lo que se concluyó que las condiciones para este tipo de estrategia aun no eran favorables.

Este procedimiento implicó una serie de pasos que significaron en términos de costos los siguientes:

-Horas hombre de trabajo para: acondicionamiento topográfico de las áreas de 5 x 5 m; colecta y mantenimiento de plántulas de juveniles hasta antes de la siembra, siembra de los ejemplares colectados.

Debido a los costos asociados a estas acciones y al nulo resultado, se decidió no continuar con esta acción hasta que la variable de salinidad y temperatura del sedimento indicara condiciones más favorables o cercanas a las de los sitios de referencia. De acuerdo a los cambios temporales (Figs. 17 a 22), estas se alcanzaron hasta el último muestreo del estudio, sin embargo, la variabilidad estacional observada (Figs. 21 y 22), indica que habría que esperar a que los intervalos de variación fuesen menores.

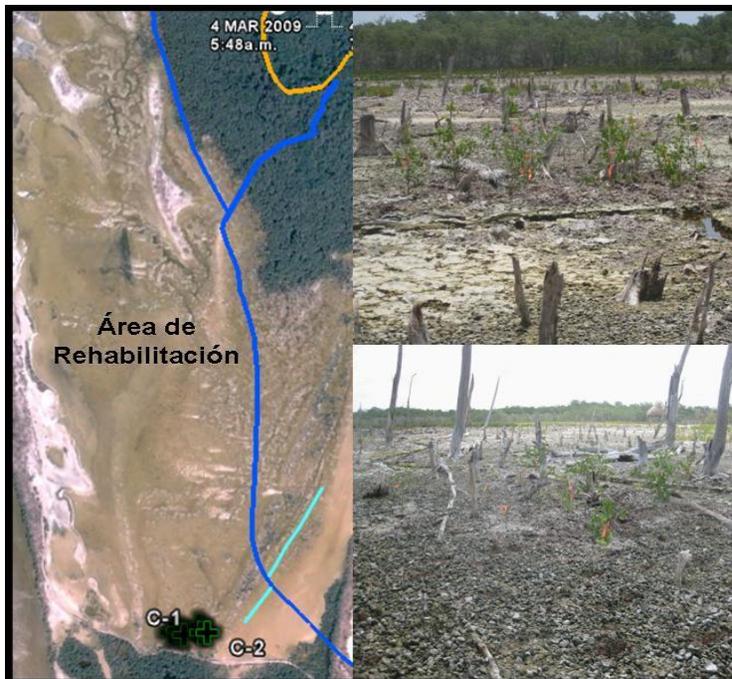


Figura 24. Centros de dispersión en la zona de rehabilitación de la localidad de Celestún.

Este es un resultado significativo en términos de justificar un programa de monitoreo asociado a un proyecto de restauración. Los resultados que se observan durante el proceso permiten aplicar el principio de “manejo adaptativo” con datos duros y respaldados técnicamente, y con ello reducir los costos económicos del proyecto.

VI.3 Regeneración de la vegetación:

La medición de plántulas se llevó a cabo en los sitios de referencia-1 (R-1) referencia-2 (R-2) y el sitio 6, debido a que son los únicos sitios donde se observaron plántulas de manglar al inicio del periodo de estudio (Fig. 25). Sin embargo, durante el muestreo del final del período de estudio del proyecto, se pudo observar que había plántulas de manglar en otros sitios (ver base de datos).

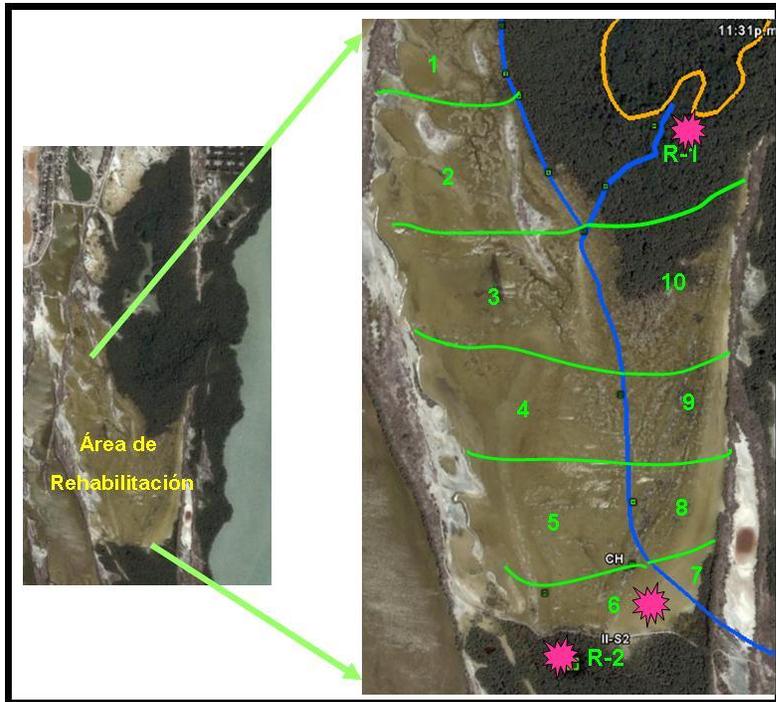


Figura 25. Ubicación del Área de Rehabilitación de Celestún.

Densidad de plántulas: En los sitios de referencia 1 y 2 se observó la mayor densidad de plántulas durante todo el período de muestreo. Al inicio del muestreo se observó la mayor densidad en el sitio de referencia 1 (52 plántula/m²), seguido del sitio referencia 2 (24 plántulas/m²) (Fig. 26). En la zona de rehabilitación se registró una densidad inicial de 18 plántulas/m² (parcela 2) y 12 plántulas/m² (parcela 1), para el siguiente período de muestreo (Tiempo 1) la densidad aumentó en las parcelas 1 (13 plántulas/m²) y 2 (plántulas/m²) de la zona de rehabilitación (Fig. 26), esto debido al establecimiento de nuevos reclutas. En el sitio de referencia 1 la densidad disminuyó (40 plántulas/m²). En el tiempo 2 la densidad disminuyó en todas las parcelas establecidas tanto en la zona de rehabilitación como en los sitios de referencia (Fig. 26), en el último período de muestreo la parcela 1 de la zona de rehabilitación presentó un incremento en la densidad (22 plántulas/m²) (Fig. 26). En los demás sitios la densidad disminuyó, esto debido a las condiciones del sitio o competencia entre los mismos individuos.

Debe tenerse en cuenta que durante el período del estudio al menos hubo dos periodos de reclutamiento, por ello los cambios de disminución y luego el aumento de la densidad de plántulas. Los escasos estudios del reclutamiento de manglares en sitios rehabilitados hidrológicamente permiten que este proyecto brinde una oportunidad para el seguimiento del proceso de dinámica poblacional con miras de aplicar el conocimiento en proyectos de restauración.

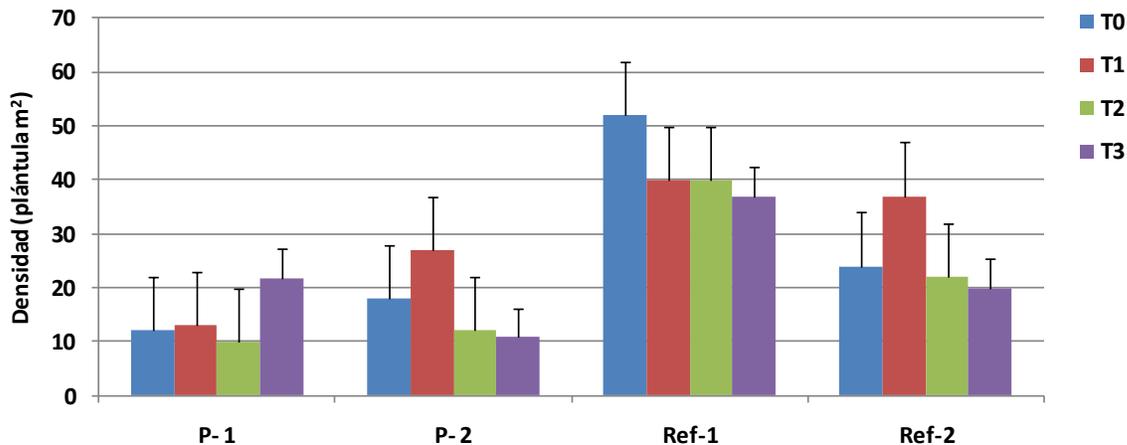


Figura 26. Monitoreo de la densidad de plántulas en los sitios de rehabilitación y de referencia de la localidad de Celestún. P-1=parcela 1, P-2=parcela 2, Ref-1=referencia 1 y Ref-2=referencia 2.

Altura de plántulas de manglar: En el sitio de rehabilitación se observó que se establecieron las 3 especies de manglar *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro) y *Laguncularia racemosa* (mangle blanco), siendo esta última la especie dominante durante el período de muestreo. En el sitio de R-1 se registraron las 3 especies de manglar, en el sitio de R-2 la especie que se observó durante todo el muestreo fue *A. germinans*.

En las parcelas de la zona de rehabilitación se registraron las mayores alturas durante todo el período de muestreo. En el primer muestreo las mayores alturas se presentaron en la parcela-1 (16 cm) seguido de la parcela-2 (28 cm). En el sitio de referencia 2 se observaron las menores alturas con una media de 19 cm (Fig. 27). Para el siguiente período de muestreo (Tiempo 1) todas las plántulas registraron incremento en la altura, siendo menor en el sitio de referencia- 2 (24 cm). En la parcela-1 de la zona de rehabilitación se presentó la mayor altura promedio (46 cm). En el último muestreo las plántulas establecidas como resultado de la rehabilitación presentaron una altura media de 163 cm (parcela-1) y 142 cm (parcela-2), siendo mucho mayor con respecto a las plántulas del sitio de referencia-1 (30 cm) y referencia-2 (47 cm) (Fig. 27).

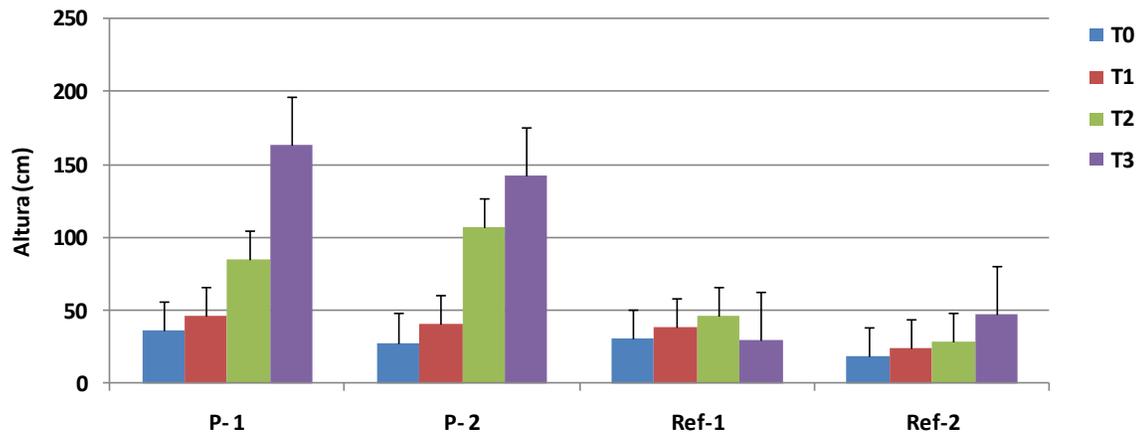


Figura 27. Altura de las plántulas de manglar en cada tiempo de muestreo en Celestún. P-1=parcela 1, P-2=parcela 2, Ref-1=referencia 1 y Ref-2=referencia 2.

En un bosque sano es común observar reclutamiento y plántulas, sin embargo, su crecimiento es menor ya que no pueden competir por luz y otros recursos con los árboles adultos, no obstante, esta característica permite inferir que el bosque tiene potencial para la recuperación por la producción “in situ” de semillas y propágulos. Sin embargo, en las parcelas de rehabilitación una vez que las condiciones de agua y sedimento se mejoran por las obras (construcción y desazolve de canales), el reclutamiento y crecimiento de las plantas que se establecen en los sitios libres de competencia se observa que es a tasas muy altas hasta que se inicia la competencia intra-específica.

VI.4 Monitoreo de la productividad de hojarasca: El promedio de la productividad total de manglar de los sitios de referencia fue mayor en el sitio R-1 ($2.67 \text{ g m}^2 \text{ día}^{-1}$) con respecto al sitio de R-2 ($1.61 \text{ g m}^2 \text{ día}^{-1}$). La estructura de la vegetación está relacionada con la producción de hojarasca, variando entre los tipos de manglar, siendo mayor en los manglares tipo franja, seguidos por los manglares tipo cuenca, lo cual se ve reflejado en estos sitios. El sitio R-1 se ubica cerca de un cuerpo de agua observándose las 3 especies de manglar. El sitio R-2 es un bosque mono específico de *A. germinans* y que se podría denominar de tipo cuenca.

En 2009 la productividad medida a través de la caída de hojarasca en el sitio R-1 presentó en los meses de septiembre a diciembre mayor caída de hojarasca ($>2.5 \text{ g m}^2 \text{ día}^{-1}$), coincidiendo con la temporada de nortes (Fig. 28). En el sitio R-2 la mayor productividad ($> 3 \text{ g m}^2 \text{ día}^{-1}$) se observó en los meses de marzo a mayo correspondiendo a la temporada de secas (Fig. 28). Para el año

2010 el sitio R-1 presentó la mayor productividad durante todos los meses con respecto al sitio R-2, registrándose la mayor productividad en los meses de junio a octubre ($> 9 \text{ g m}^2 \text{ día}^{-1}$), en el sitio R-1. (Fig. 28).

Un aspecto que habría que resaltar, es que a partir de la fecha en la que se hicieron las obras de rehabilitación el sitio R-1 incrementó su productividad. Sin embargo, no se cuenta con evidencia documental que éste incremento se deba a las obras.

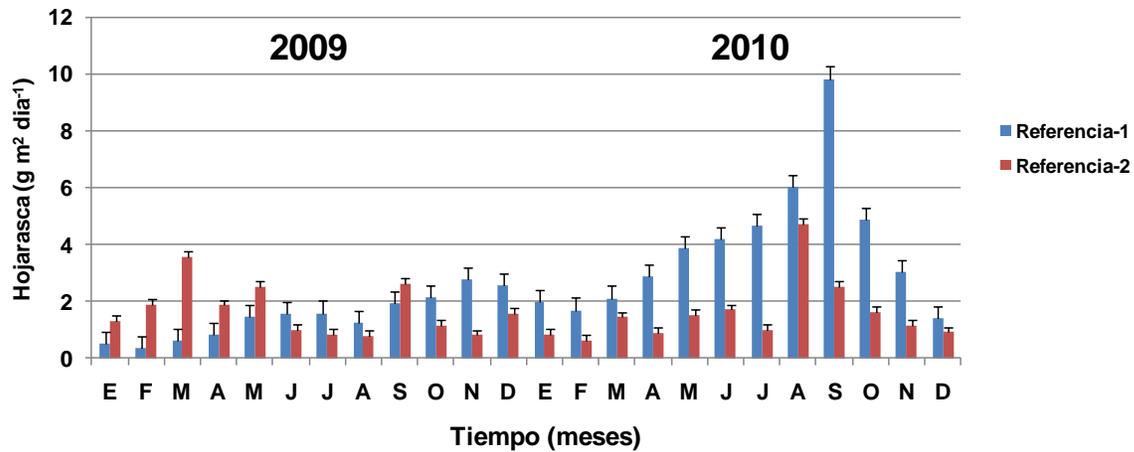


Figura 28. Monitoreo de la productividad de hojarasca en el manglar de Referencia 1 y 2 de la localidad de Celestún.

VII. REHABILITACION DE LOS MANGLARES EN PUERTO PROGRESO

VII.1 Caracterización ambiental del sitio: Progreso

En el área de Progreso se realizó la caracterización ambiental durante el mes de diciembre de 2008 y enero de 2009 principalmente. Para ello, primero se procedió a zonificar el área de trabajo en 10 sitios (Fig. 29), ocho corresponden a sitios específicos donde se tiene la meta de la rehabilitación (1 a 8), y dos sitios de referencia (Ref-1 y Ref-2), que corresponde a zonas de manglares vivos adenaños a la zona de interés.

En los manglares vivos se hizo un levantamiento de campo de las variables estructurales de los árboles, la regeneración potencial, así como la toma de agua intersticial. En cada sitio de rehabilitación se tomaron núcleos de sedimentos, muestras de agua para análisis de nutrientes y datos de salinidad intersticial como parte de la información del tiempo inicial y como referencia para determinar el éxito de las acciones de rehabilitación en un muestreo del final del período que abarca el financiamiento de este proyecto.

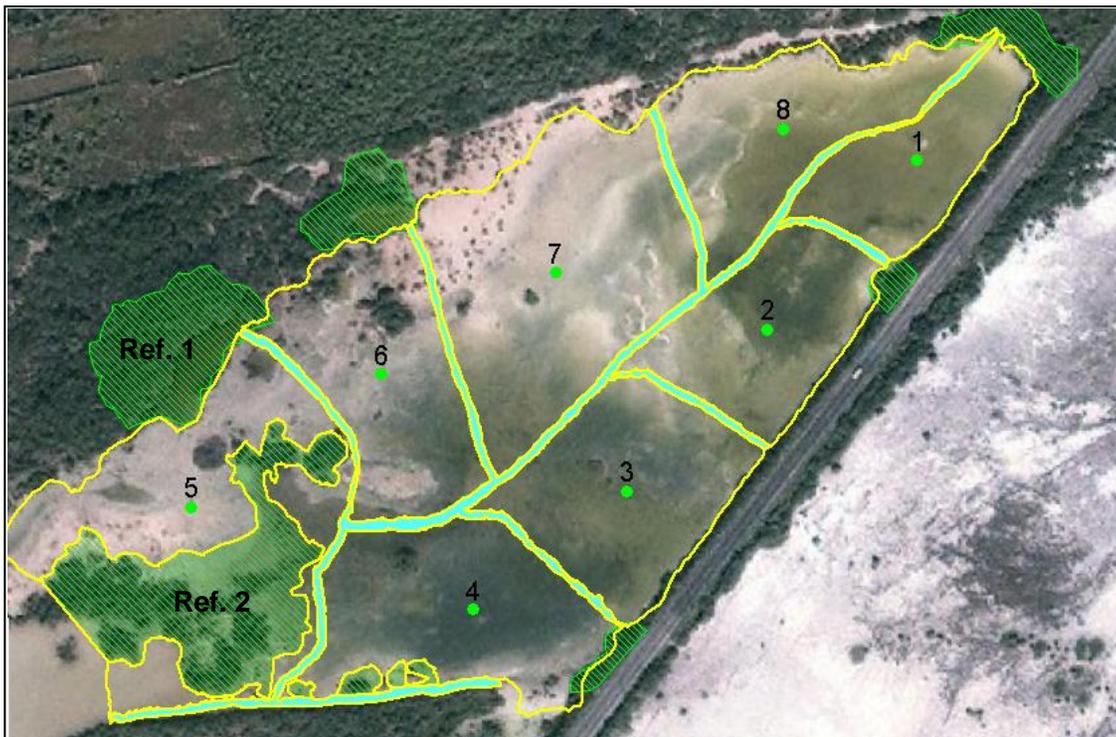


Figura 29. Ubicación de los sitios en los que se encuentra dividida la zona de rehabilitación en puerto Progreso.

Estructura forestal: Para la determinación de la estructura de árboles adultos, en cada uno de los sitios de referencia se establecieron dos parcelas permanentes (10 X 10 m), siguiendo las especificaciones estándar de estudios forestales (Fig. 30). Las variables medidas en cada una de las parcelas fueron: diámetro a la altura del pecho (DAP), el cual proporciona información cuantitativa sobre la estructura de la masa arbórea, con esta medida se calculó el área basal. Para obtener esta medida se utilizó una cinta diamétrica tomándola a la altura del pecho del observador. También se determinó la altura de cada árbol y la densidad. La medición de estas variables solo se realizó en los sitios de referencia (R-1 y R-2), debido a que solo ahí hay presencia de árboles de manglar vivos.



Figura 30. Medición de las variables estructurales del manglar en los sitios de referencia de puerto progreso.

Regeneración potencial: Se establecieron cuatro parcelas de plántulas y juveniles. Tres de ellas circulares con radio de 10 m y una cuadrada de 10 x 10m (Fig. 31). Las parcelas 1 y 2 se consideran réplicas para la medición de plántulas y corresponde a un sitio con alto grado de deterioro, en el caso de la parcela 3 es un sitio en donde se observaron plántulas al inicio del proyecto, y por último la parcela 4 que corresponde a un manglar en buen estado de conservación y con regeneración natural.

Para la determinación de juveniles la medición fue realizada en la parcela 4, debido a que solo ahí había presencia de juveniles de manglar al inicio del período de estudio.



Figura 31. Localización de las parcelas para la determinación de la regeneración natural, y ejemplo de la medición de los juveniles.

Salinidad Intersticial:

En cada uno de los sitios específicos (8 sitios) para la zona de rehabilitación se tomaron muestras de agua intersticial entre 30 y 40 cm de profundidad para medir la salinidad, a través de una sonda multiparamétrica YSI-30 (Fig. 32).

Figura 32. Colecta de agua intersticial para la medición de la salinidad.



Sedimentos:

En cada uno de los 8 sitios del área de rehabilitación, así como en los 2 sitios de referencia, se tomaron 2 muestras de sedimento con ayuda de un nucleador de 6 cm de diámetro y 40 cm de largo. A las muestras se les llevó a cabo la medición de densidad aparente (bulk density), materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo total). Las muestras fueron tomadas al inicio y al final de las acciones de rehabilitación (Fig. 33).



Figura 33. Toma de núcleos para la determinación de las características del suelo.

VII.2 Resultados de la caracterización: Progreso

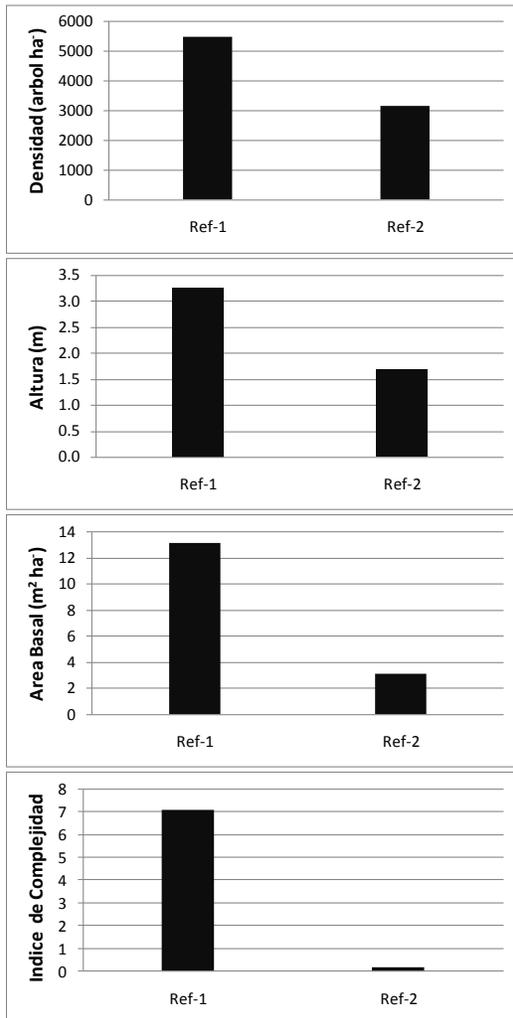


Figura 34. Variables estructurales de los sitios de Referencia 1 y 2 de la zona de rehabilitación de la localidad de puerto Progreso.

Estructura forestal: De acuerdo a las variables estructurales el sitio de referencia-1 (R-1), presentó mejor desarrollo estructural que el sitio de referencia-2 (R-2) de acuerdo al índice de complejidad (Fig. 34). En los demás sitios (sitio 1 al sitio 8), no se llevaron a cabo mediciones de árboles adultos debido a que no hay individuos vivos, sin embargo, se estimó poder medir DAP de árboles muertos, una referencia de lo que había antes de los impactos. El sitio de referencia 1 está dominado por *R. mangle* con individuos de *L. racemosa* y

A. germinans. Por otra parte la referencia 2 es un manglar mono específico de *A. germinans*. En la figura 25 se indican las características forestales de cada sitio de referencia.

Salinidad Intersticial: La salinidad promedio de la zona de rehabilitación fue de 81.9 g/kg, siendo el sitio 2 donde se registró la salinidad más alta (126 g/kg), mientras que en los sitios de referencia la salinidad promedio fue de 61.4 g/kg, siendo en el R-1 donde se registró la menor salinidad (41.7 g/kg) (Fig. 35). La salinidad en altas concentraciones es un estresor que afecta en el establecimiento y crecimiento de individuos, por lo que en los sitios 1-8 no se observó la presencia de árboles adultos y plántulas de manglar.

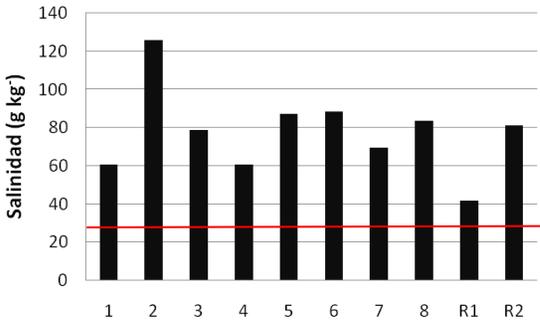


Figura 35. Salinidad intersticial de todos los sitios de la zona de rehabilitación en puerto progreso. La línea roja representa el valor de referencia al que se aspiraba llegar al final del periodo de monitoreo que el proyecto abarcaba.

Materia orgánica y densidad del suelo: Los valores de materia orgánica determinados en puerto Progreso variaron entre 12.4 y 20.4 % en los sitios de muestreo. En el caso de Progreso los bajos contenidos de materia orgánica son debido a que el suelo del manglar fue rellenado con materiales de dragado. La pobre calidad del suelo es probable que haya tenido efectos en la velocidad de la recuperación del manglar. Respecto a la densidad del suelo, hay una relación directa con el contenido de materia orgánica, los valores de densidad en los sitios de rehabilitación fueron entre 0.75 gr cm⁻³ y 1.16 gr cm⁻³, en comparación con los manglares de referencia donde los valores de densidad están por debajo 0.68 gr cm³ (Fig. 36).

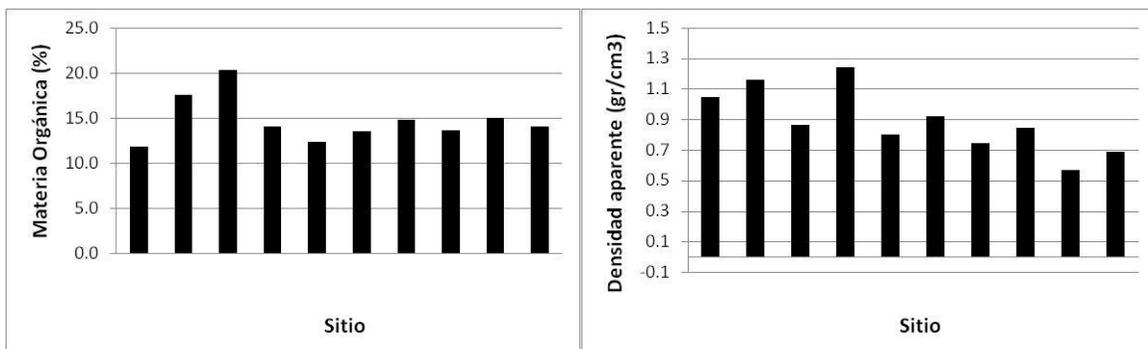


Figura 36. Contenido de materia orgánica y densidad del suelo en los sitios de la zona de rehabilitación de puerto Progreso.

Potencial Redox y pH: El valor de pH en el sitio 1 fue el más elevado respecto a los demás sitios (7.9), seguido del sitio 3 y 7. El sitio 6 presentó el menor pH (6.8). Los valores de redox estuvieron en un intervalo de -189 y -402 mV. Los sitios 1 y 7 fueron en donde se registraron los valores más negativos (Fig. 37).

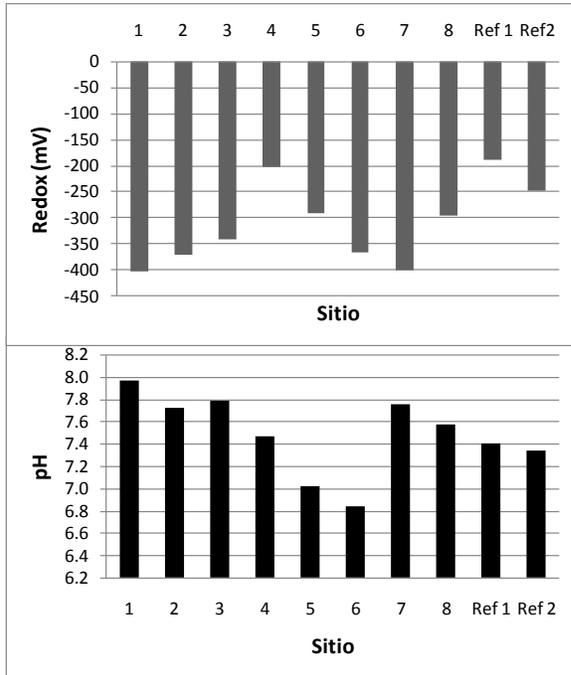
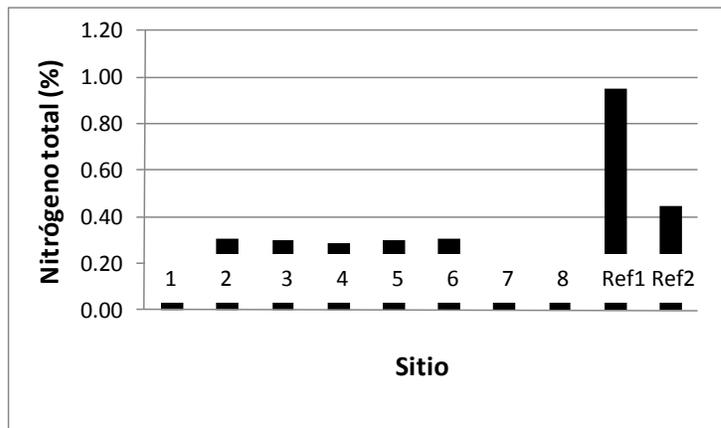


Figura 37. Valores de Redox y pH de los sitios en la zona de rehabilitación de puerto Progreso.

Los valores tan negativos de redox (<-250 mV) sugieren que los procesos de degradación de materia orgánica están sucediendo en condiciones de anaerobiosis extrema. El olor a ácido sulfhídrico no es sorprendente y es probable que en los sitios de -400 mV la producción de metano por reducción de los carbonatos se esté llevando a cabo, por lo que este sitio degradado estaría contribuyendo a la producción de gases invernadero en caso de no favorecer su rehabilitación.

Nitrógeno total del suelo: En general el contenido de NT de los sedimentos de los sitios de rehabilitación estuvo en el intervalo de 0.149 – 0.304%, mientras que en los sitios de referencia el intervalo fue de 0.44 a 0.95 %. El sitio R-2 presentó el mayor porcentaje de NT (3.04%), mientras que el sitio de rehabilitación 1 presentó el menor porcentaje de NT (1.49%) (Fig. 38). Existe una relación directa de concentración la materia orgánica con la disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, los cuales se vuelven disponibles para la planta a través los procesos de descomposición y mineralización..

Figura 38. Concentración de nitrógeno total en el suelo de manglar de los sitios de puerto Progreso.



Fósforo total del suelo: Los bosques de manglar asociados con sedimentos carbonatados donde el aporte de nutrientes alóctonos es mayor para nitrógeno y bajo para fósforo, este último podría ser limitante para el desarrollo y recuperación de los manglares en la zona de rehabilitación. En la mayoría de los sitios de rehabilitación el contenido de PT es $<0.12\%$. El sitio 3 fue donde se registro el % más alto de fósforo total 0.119% (Fig. 39), sugiriendo que podría ser un sitio para el establecimiento de centros de dispersión.

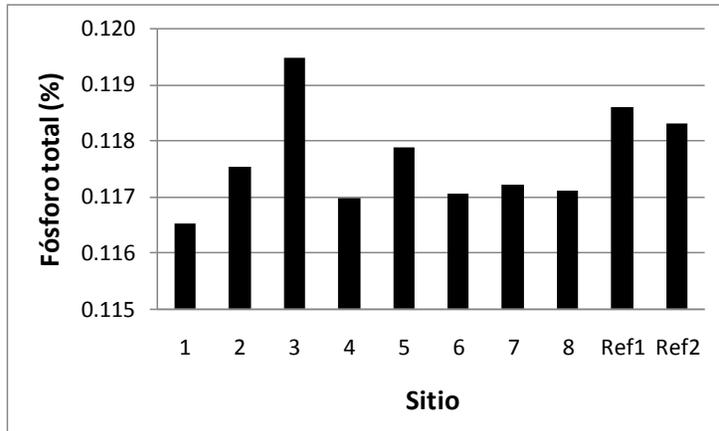


Figura 39. Concentración de fósforo total en el suelo de manglar de los sitios de puerto Progreso.

Nutrientes inorgánicos en agua intersticial: En la Figura 40 se presentan los valores promedio de las concentraciones iniciales de los nutrientes del agua intersticial de los sitios de rehabilitación. El promedio de la concentración de nitritos fue de $0.54\ \mu\text{M}$, el valor máximo se detectó en el sitio 3 con $1.58\ \mu\text{M}$ y el valor mínimo en el sitio 5 con $0.14\ \mu\text{M}$. Los valores de referencia tuvieron un valor promedio de $0.25\ \mu\text{M}$, por lo que corresponde al 45% del valor promedio en el sitio de rehabilitación.

El promedio de la concentración de nitratos fue de $15.43\ \mu\text{M}$, el valor máximo se detectó en el sitio 3 con $15.4\ \mu\text{M}$ y el valor mínimo en el sitio 6 con $4.40\ \mu\text{M}$. Los valores de referencia tuvieron un valor promedio de $4.50\ \mu\text{M l}^{-1}$, por lo que corresponde al 56% del valor promedio en el sitio de rehabilitación.

El promedio de la concentración de amonio fue de $116\ \mu\text{M}$, el valor máximo se detectó en el sitio 7 con $158.8\ \mu\text{M}$ y el valor mínimo en el sitio 8 con $23.6\ \mu\text{M}$. Los valores de referencia tuvieron un valor promedio de $27.50\ \mu\text{M}$, por lo que corresponde al 23% del valor promedio en el sitio de rehabilitación.

El promedio de la concentración de fosfatos fue de 2.28 μM el valor máximo se detectó en el sitio 1 con 3.95 μM y el valor mínimo en el sitio 8 con 23.6 μM . Los valores de referencia tuvieron un valor promedio de 3.14 μM , por lo que corresponde al 137% del valor promedio en el sitio de rehabilitación.

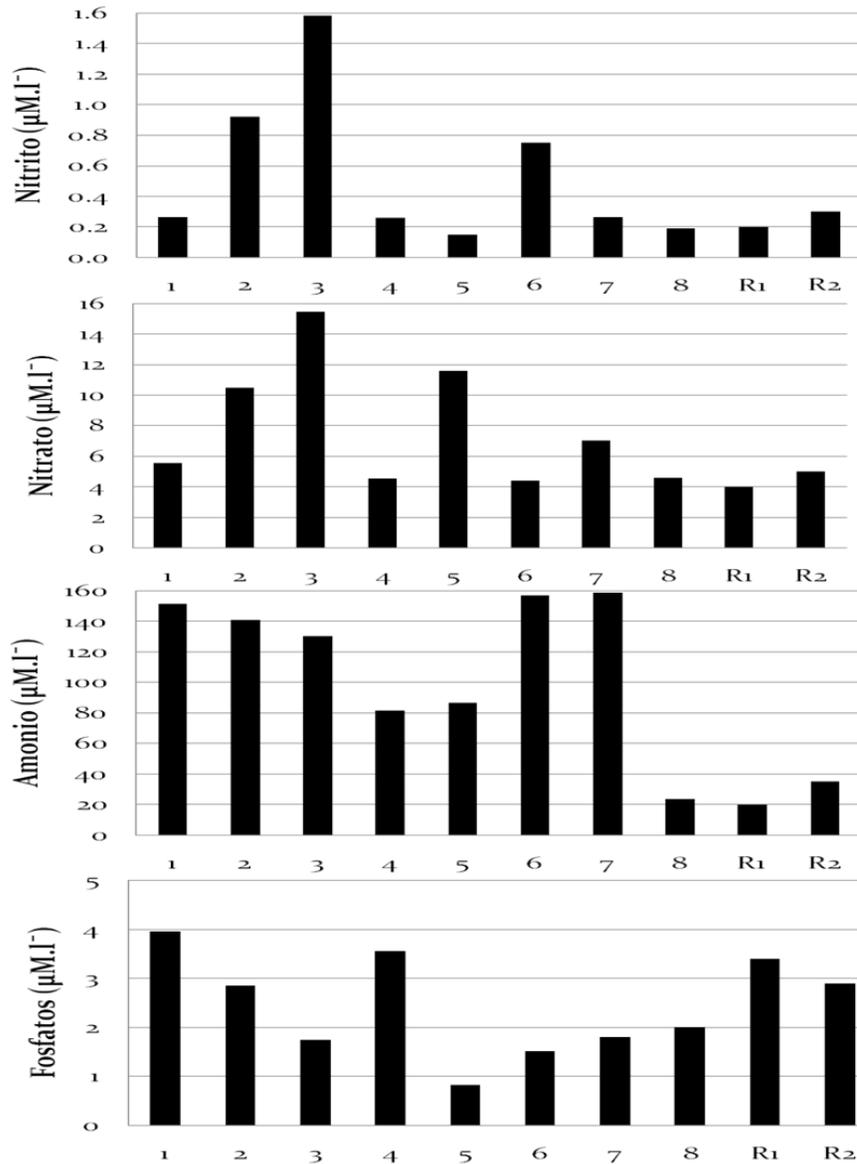


Figura 40. Nitritos, nitratos, amonio y fosfatos en agua intersticial de los sitios de la zona de rehabilitación.

VII.3 Acciones de rehabilitación y programa de monitoreo: Progreso



1-Acondicionamiento de áreas hipersalinas para reforestación: En los sitios donde se han realizado obras de restauración como la apertura de canales, se han establecido estaciones discretas para la medición de salinidad en agua intersticial y temperatura. Con el monitoreo de éstas estaciones se consideraron áreas específicas para realizar el experimento de regeneración inducida a través de centros de dispersión.

Figura 41. Mapa de la ubicación de la construcción de canales: primario y secundarios. También se muestra imágenes durante y después de su construcción.

2-Construcción de canales para reintroducir agua a la zona de rehabilitación: Se realizó un canal principal que inicia en la parte sur y que conecta con la laguna de Chelém y finaliza al norte del área de estudio: Este canal principal cuenta con 556 m de largo, 3 m de ancho y 0.6 m de profundidad; asimismo se excavaron 7 canales secundarios que suman 637 m de longitud, de 1.20 m de ancho por 0.6 m de profundidad (Fig. 41), sumando un total de 1513 m de canales. De acuerdo a lo anterior, las metas de las acciones propuestas fueron superadas significativamente, esto en parte de la negociación con los grupos locales que están realizando el trabajo de rehabilitación hidrológica. A estos canales se le tuvo que dar mantenimiento en tres ocasiones durante el período del proyecto. Las condiciones del sitio y su estado previo eran muy adversas, ya que éste fue lugar de depósito de sedimentos de actividades de dragado del puerto de Yucalpeten.

3-Selección de sitios y de especies nativas: Ya acabadas las obras de rehabilitación se procedió a coleccionar propágulos para llevar los experimentos de regeneración inducida y centros de dispersión.

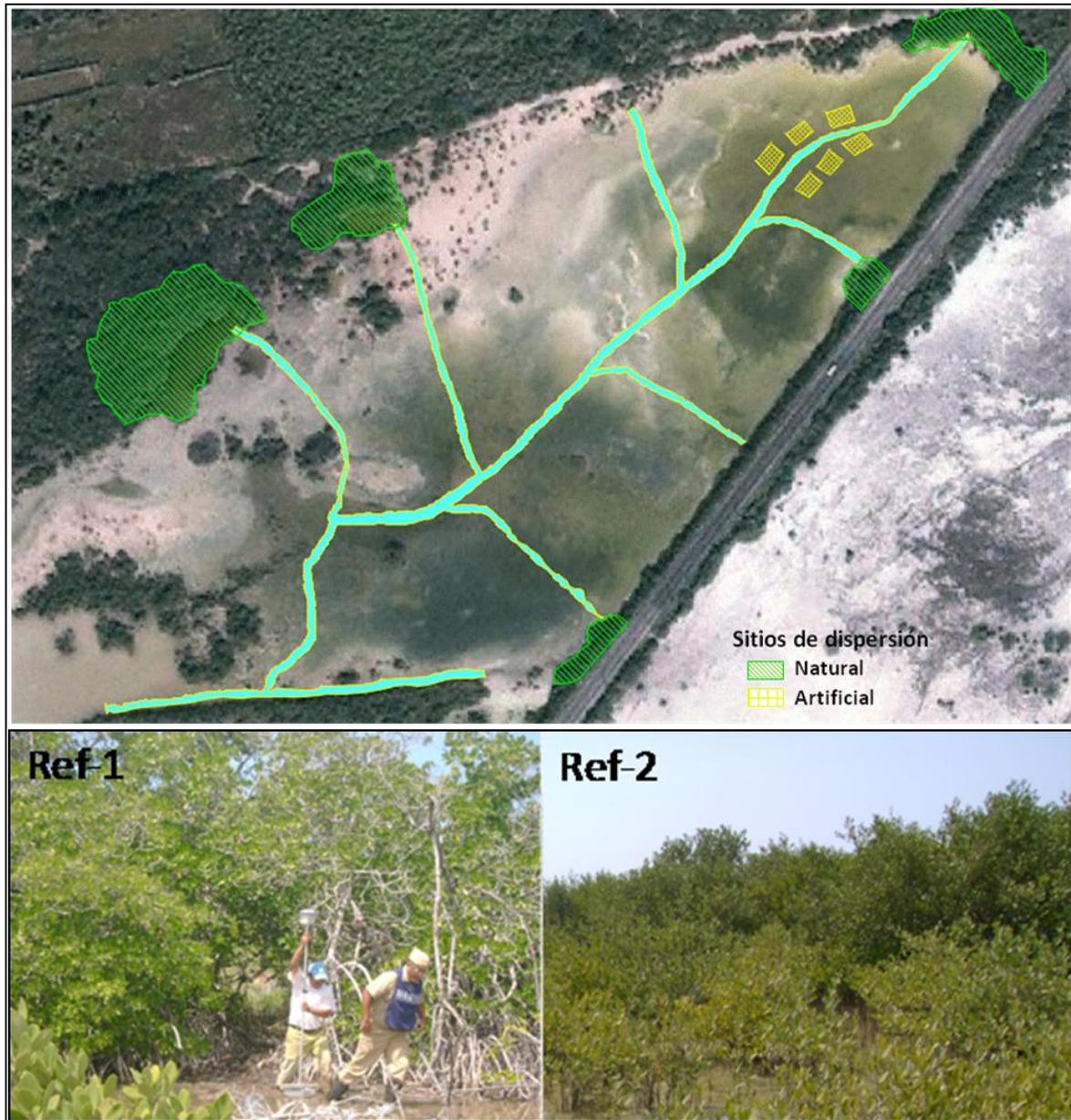


Figura 42. Ubicación de los sitios para la colecta de propágulos y experimentos de regeneración inducida. También se muestran algunas imágenes del tipo de manglar predominante que servirá de fuente de propágulos.

VIII. RESULTADO DEL MONITOREO: PROGRESO

VIII.1 Variables ambientales

Salinidad intersticial de los 10 sitios de la zona de rehabilitación: En el sitio 2, 7 y 8 se registraron las mayores salinidades durante el tiempo T1 (mayor a 100 g/kg), seguido del sitio 3 (97 g/kg). El sitio 1 presentó las menores salinidades con 25 g/Kg en el mes de octubre en comparación de los demás sitios de rehabilitación (Figs. 43 y 44).

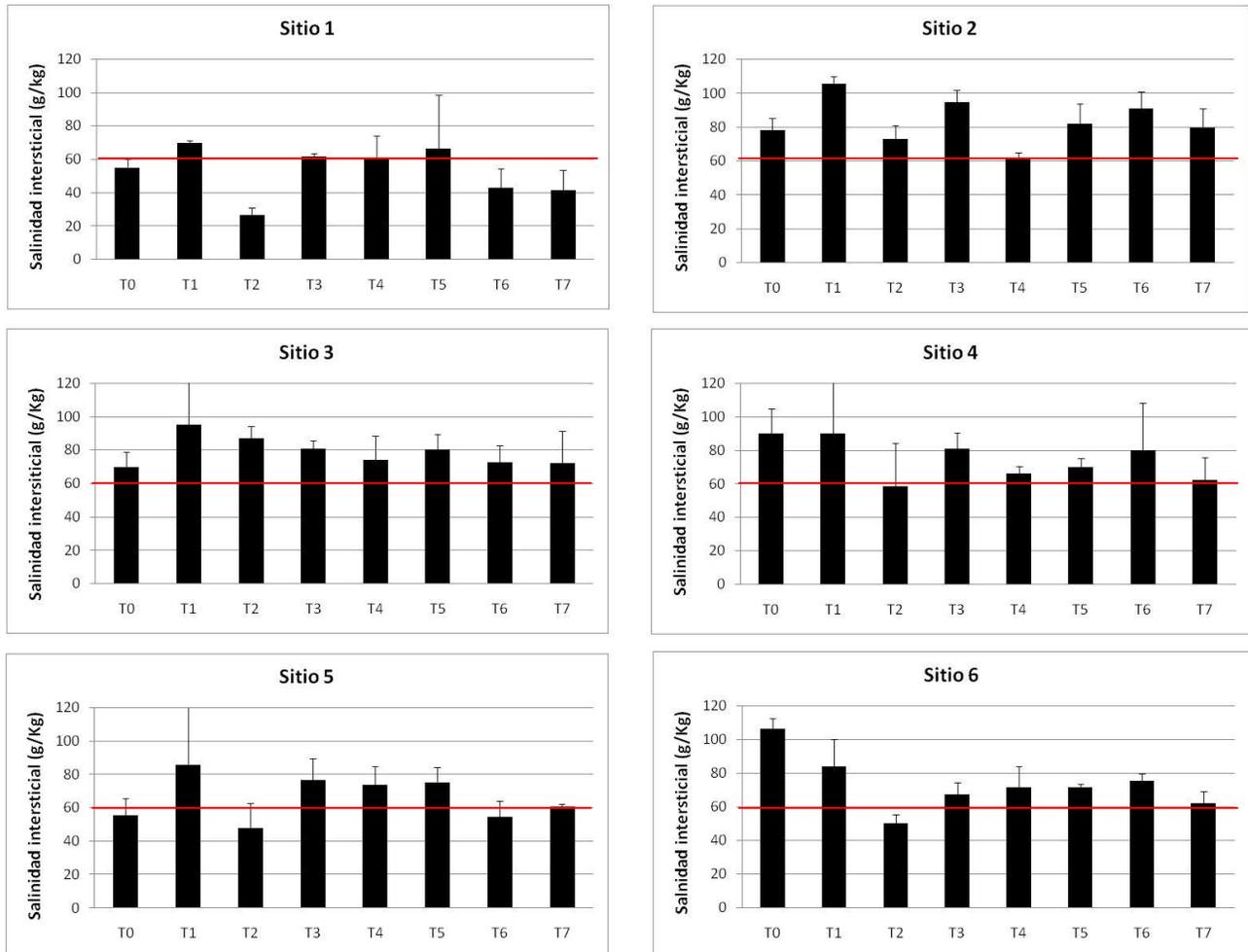


Figura 43. Salinidad intersticial de los sitios rehabilitación de puerto Progreso, donde T0 (Noviembre 2008) a T7 (Noviembre 2010). La línea roja representa el nivel de referencia al que se aspiraba al final del proyecto.

El sitio de referencia 1 presentó las menores salinidades durante todo el tiempo de muestreo con valores entre 25 y 64 g/kg. Por otra parte el sitio de referencia 2 presentó valores entre 60 y 80 g/kg (Fig. 46b).

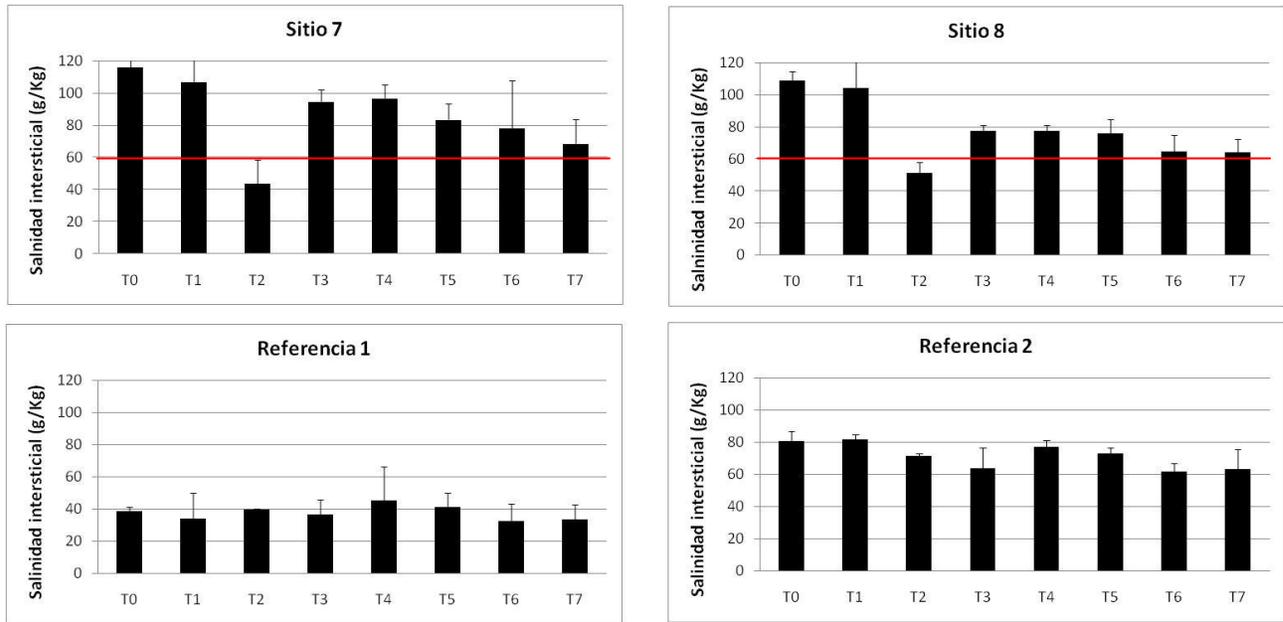


Figura 44. Salinidad intersticial de los sitios rehabilitación de puerto progreso, donde T0 (Noviembre 2008) a T7 (Noviembre 2010). La línea roja representa el nivel de referencia al que se aspiraba al final del proyecto.

Con el monitoreo de la salinidad del suelo en todos los sitios se pudieron observar cambios significativos, ya que el intervalo de variación al inicio del estudio y antes de las acciones de restauración varía entre 55-116 g/kg, y al final del período de este estudio se registró un decremento del intervalo de variación que fue entre 41-80 g/kg. Este resultado indica que la meta de rehabilitar el sitio teniendo como medida de funcionamiento a la salinidad se alcanzó. Sin embargo, se sugiere darle continuidad al programa de monitoreo para observar si la reducción de la salinidad se mantiene con el tiempo. Los valores que actualmente presenta el sitio en lo general son cercanos a los sitios de referencia dominados por *A. germinans* (salinidades entre 60 y 80 g/kg).

VIII.2. Centros de Dispersión: Para llevar a cabo la experimentación de los centros de dispersión (Figs. 45 y 46), se acondicionaron 12 parcelas de 2 x 10 m en donde se colocó sedimento de manglar que se obtuvo de la excavación de los canales (Fig. 45). Se plantaron propágulos de *R. mangle* como primera prueba



Figura 45. Ubicación de los centros de dispersión en la zona de rehabilitación de la localidad de puerto Progreso (círculo rojo).



Figura 46. Centros de dispersión en Puerto Progreso.

Al igual que en Celestún, después de 6 meses se observó que todos los individuos murieron, por lo que se concluyó que las condiciones para este tipo de estrategia aun no eran favorables.

Los resultados negativos llevaron a la decisión de no continuar con esta acción hasta que las variables del sedimento (salinidad y temperatura) sean adecuadas o cercanas a las de los sitios de referencia. De acuerdo a los cambios temporales (Figs. 43 y 44), se observó una disminución en la salinidad intersticial, sin embargo, el hidroperiodo y el bajo contenido de nutrientes en el sedimento está limitando el establecimiento de plántulas en la zona de rehabilitación.

Siendo este un resultado significativo en términos de justificar un programa de monitoreo asociado a un proyecto de restauración. Los resultados permiten aplicar el principio de “manejo adaptativo”, así como sugerir acciones complementarias para acelerar el proceso de recuperación de la cobertura vegetal. El sustento técnico lo está dando el análisis de los datos duros del monitoreo, y con ello reducir los costos económicos del proyecto.

VIII.3 Regeneración de la Vegetación. Los sitios de referencia son bosques mono específicos, el sitio de referencia 1 (Ref. 1) es dominado por *Rhizophora mangle*, mientras que el sitio de referencia 2 (Ref. 2) lo es *Avicennia germinas* (Fig. 47). En los sitios Ref. 2, 4 y 7 fueron en los que

en el inicio del proyecto se establecieron parcelas para el monitoreo de la regeneración natural favorecida por las acciones de rehabilitación hidrológica.

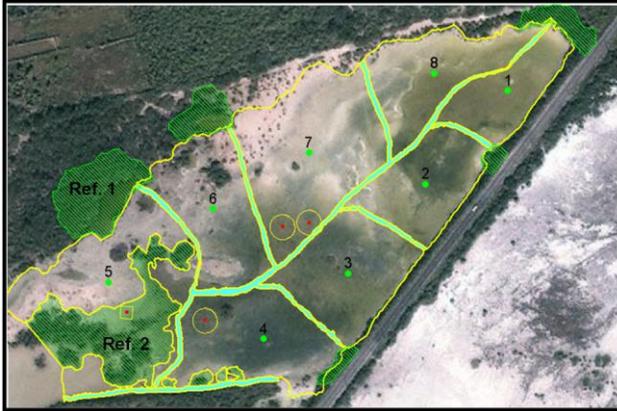


Figura 47. Ubicación del Área de Rehabilitación de puerto progreso.

Plántulas: La mayor densidad promedio de plántulas de *Avicennia germinans* se registró en el sitio de Referencia (2.08 plántula/m²), seguido del sitio de la parcela 2 (P-2) con 0.63 plántula/m² y por último la parcela 1 (P-1) con 0.12 plántula/m² (Fig. 46). En los otros sitios todavía no se establecen plántulas de manglar.

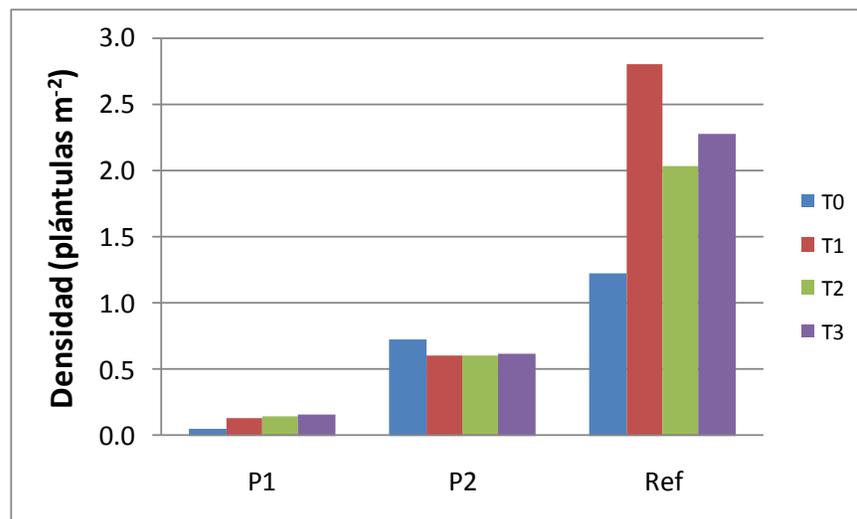


Figura 48. Densidad de plántulas en los sitios de rehabilitación por tiempo de la localidad de puerto Progreso. P-1=parcela 1, P-2=parcela 2 y Ref=referencia.

Altura y crecimiento de plántulas de manglar: En las tres parcelas se registró incremento en altura, observándose el cambio de plántula a juvenil, (>50 cm de altura) (Fig. 49). La tasa de crecimiento en altura de las plántulas de *Avicennia germinans* fue de 0.056 cm/día establecidas

en la parcela 1, y en la parcela 2 se registro una tasa de crecimiento de 0.033 cm/día, mientras que en el sitio de referencia fue de 0.044 cm/día.

La tasa de crecimiento en altura de las plántulas establecidas en el sitio de referencia se presenta entre los valores de las tasas de crecimiento observadas en las parcelas 1 y 2, indicando que las condiciones están favoreciendo el crecimiento de las plántulas de manglar.

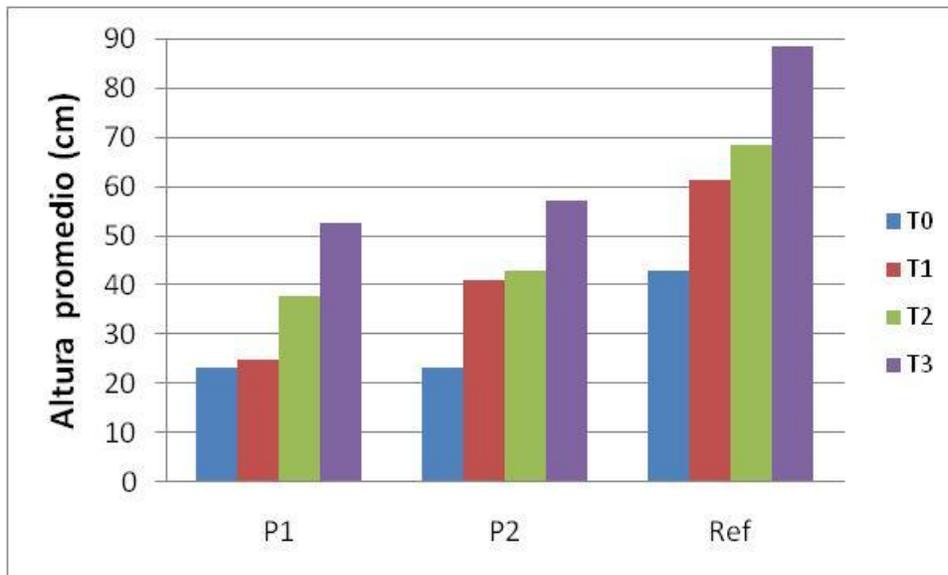


Figura 49. Altura de las plántulas de manglar por tiempo en la zona de rehabilitación en puerto Progreso. P-1=parcela 1, P-2=parcela 2 y Ref=referencia.

Este resultado indica que la meta de restablecer condiciones ambientales para que se lleve a cabo el proceso de regeneración del manglar en el sitio de Progreso, se ha alcanzado.

El seguimiento a través de la ampliación del programa de monitoreo podrá determinar el tiempo requerido para que al menos el 50% de la superficie afectada tenga cobertura de plántulas.

El procedimiento sugerido es de hacer recorridos estacionales en todos los sitios en los que se dividió el área, y hacer el conteo del número de plántulas en parcelas de 5 x 5 m y de al menos 5 parcelas por sitio (total 45 parcelas).

VIII.4 Monitoreo de la producción de hojarasca: Progreso. Al igual que Celestún se instalaron canastas repartidas en cada una de parcelas establecidas en los sitios de referencia; la colecta se llevo a cabo de manera mensual. Las muestras colectadas fueron secadas, separadas y pesadas por componente. El manglar de referencia 1 lo constituye un bosque dominado por *R. mangle* y para el caso de la referencia 2 lo domina *A. germinans*.

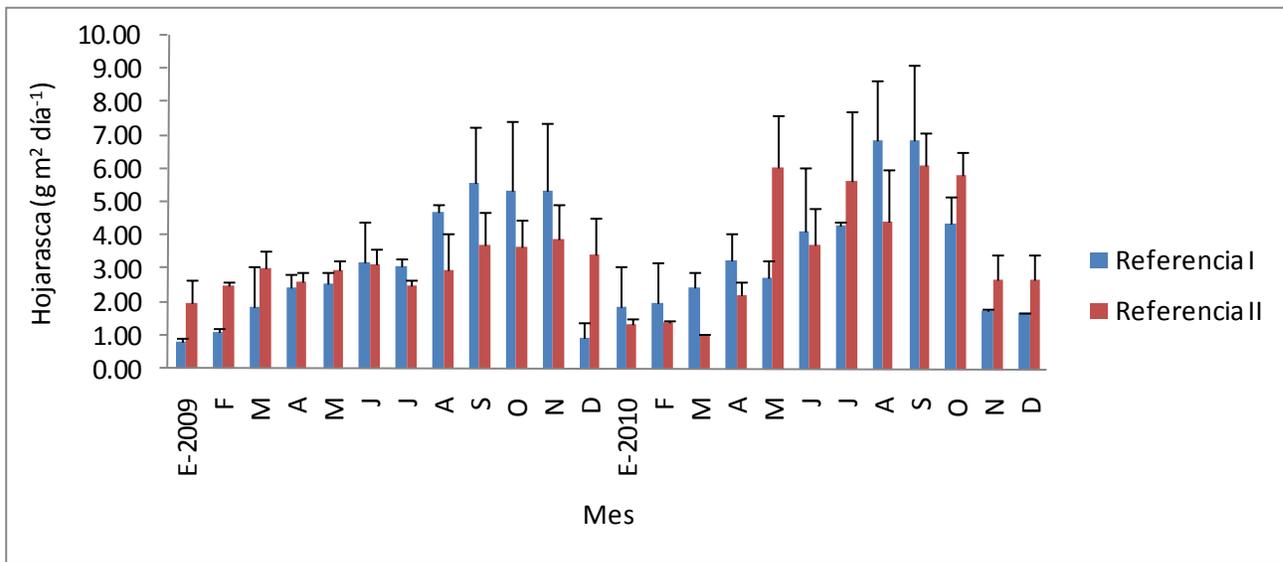


Figura 50. Variabilidad anual en la caída de hojarasca de Puerto Progreso en cada una de las parcelas. (Período de E=enero a O=octubre).

El promedio de productividad total del manglar en Puerto Progreso fue de $3.10 \text{ g m}^2 \text{ día}^{-1}$ en el manglar de la referencia 1 y de $3.37 \text{ g m}^2 \text{ día}^{-1}$ en el manglar de la referencia 2. La productividad más alta se registró durante la temporada de lluvias, observándose los valores más altos en los meses de septiembre y octubre para los dos años, en los meses de enero, febrero y marzo (ambos años) fueron los meses donde se registró la menor caída de hojarasca.

El máximo valor de caída de hojarasca se presentó en el sitio de referencia 1 durante el mes de agosto del 2010 con $6.89 \text{ g m}^2 \text{ día}^{-1}$, y la menor caída de hojarasca se presentó en el sitio de referencia 1 durante el mes de enero de 2009 con $0.84 \text{ g m}^2 \text{ día}^{-1}$ (Fig. 50). El comportamiento a través de año con la caída de hojarasca es similar entre los sitios de referencia.

Estos resultados de productividad servirán de referencia para cuando no sólo se recobre la estructura de la vegetación sino también la función, estas variables podrán servir para las medidas de éxito de las acciones de rehabilitación.

IX. MONITOREO DEL HIDROPERIODO

IX.1 Hidroperiodo de Celestún

La hidrología es una de las variables más importantes para la conservación y restauración de los humedales costeros, y en particular el hidroperiodo. Este está determinado por la frecuencia, la duración y el nivel de inundación, lo cual influye en las condiciones de oxido-reducción de los sedimentos, así como en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas de manglar.

Para el caso de la localidad de Celestún se instalaron instrumentos con sensores de presión, temperatura y conductividad. Uno en el canal construido para introducir agua a la zona de rehabilitación (Canal bloque E), otro en la zona de rehabilitación (bloque E), y un tercero en una zona de manglar impactado (bloque F) pero sin ningún tipo de acción.

En canal construido permaneció todo el tiempo inundado, por lo que la obra fue bien diseñada para el propósito de introducir agua de la laguna al humedal. El mayor nivel de inundación se registró de mayo a agosto, alcanzando un nivel máximo de 60 cm (Fig. 51-A). Los niveles más bajos se presentaron de septiembre a diciembre del 2010 (Fig. 51-A). Con respecto a la frecuencia de inundación referida como el número de eventos por mes (#/mes), el mayor número se registró de enero a mayo (Fig. 51-B), en este último con el mayor número de inundaciones (35e/mes), mientras que en diciembre-2009 y noviembre-2010 se observó la menor frecuencia de inundación (9e/mes).

Con respecto al tiempo que permanece inundado (hr/mes), en octubre-2009 se registró el mayor tiempo de inundación (576 hr/mes), seguido del mes de abril-2010 (519 hr/mes), mientras que el menor tiempo de inundación de observo en agosto-2009 (37 hr/mes) (Fig. 51-C).

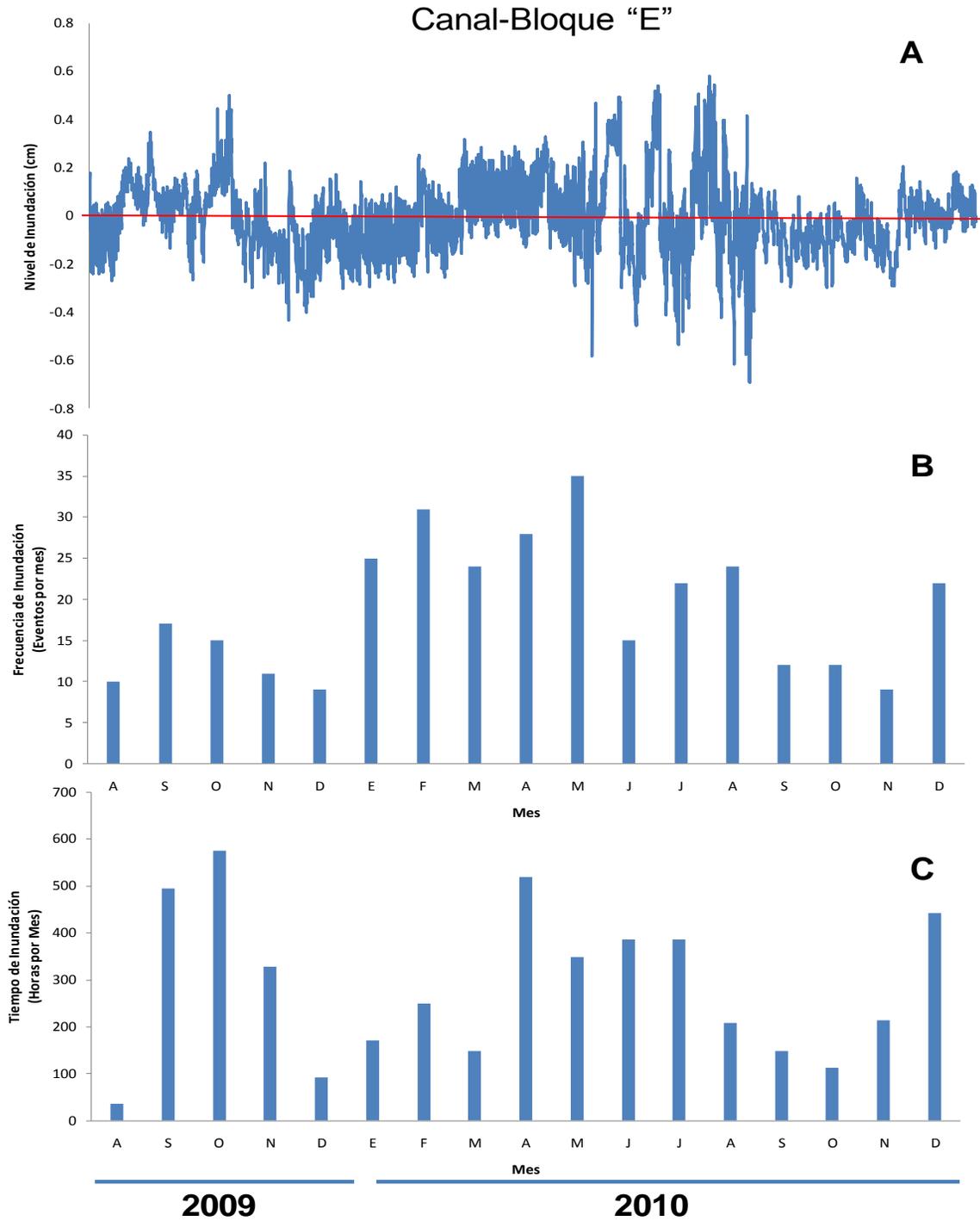


Figura 51. Nivel de inundación (A), tiempo de inundación (B) y frecuencia de inundación (C) en el Canal del Bloque "E" de la zona de rehabilitación de la localidad de Celestún.

En el bloque “E” que corresponde al sensor de la zona de rehabilitación, se observa que el nivel máximo de inundación se presentó en el mes de mayo-2010 (60 cm) (Fig. 52- A), mientras que en el mes de octubre no hubo inundación tanto para el año del 2009 y 2010 (Fig. 52).

Con respecto al número de veces que se inunda el sitio (frecuencia), en el mes de noviembre-2009 se registró el mayor número de eventos (19e/mes) (Fig. 52-B), seguido diciembre-2009 (18e/mes) y enero 2010 (17e/mes). La menor frecuencia de inundación se observó en agosto-2010 (2 eventos por mes) y noviembre-2010 (1e/mes) (Fig. 52-B). Con respecto al tiempo que permaneció inundada la zona de rehabilitación fue mayor de febrero a mayo de 2010, permaneciendo mayor tiempo inundado en mayo (730 hr/mes) (Fig. 52-C), mientras que el menor tiempo de inundación se registró en noviembre-2010 (4 hr/mes). Los valores de 0 significan que el sitio no estaba inundado.

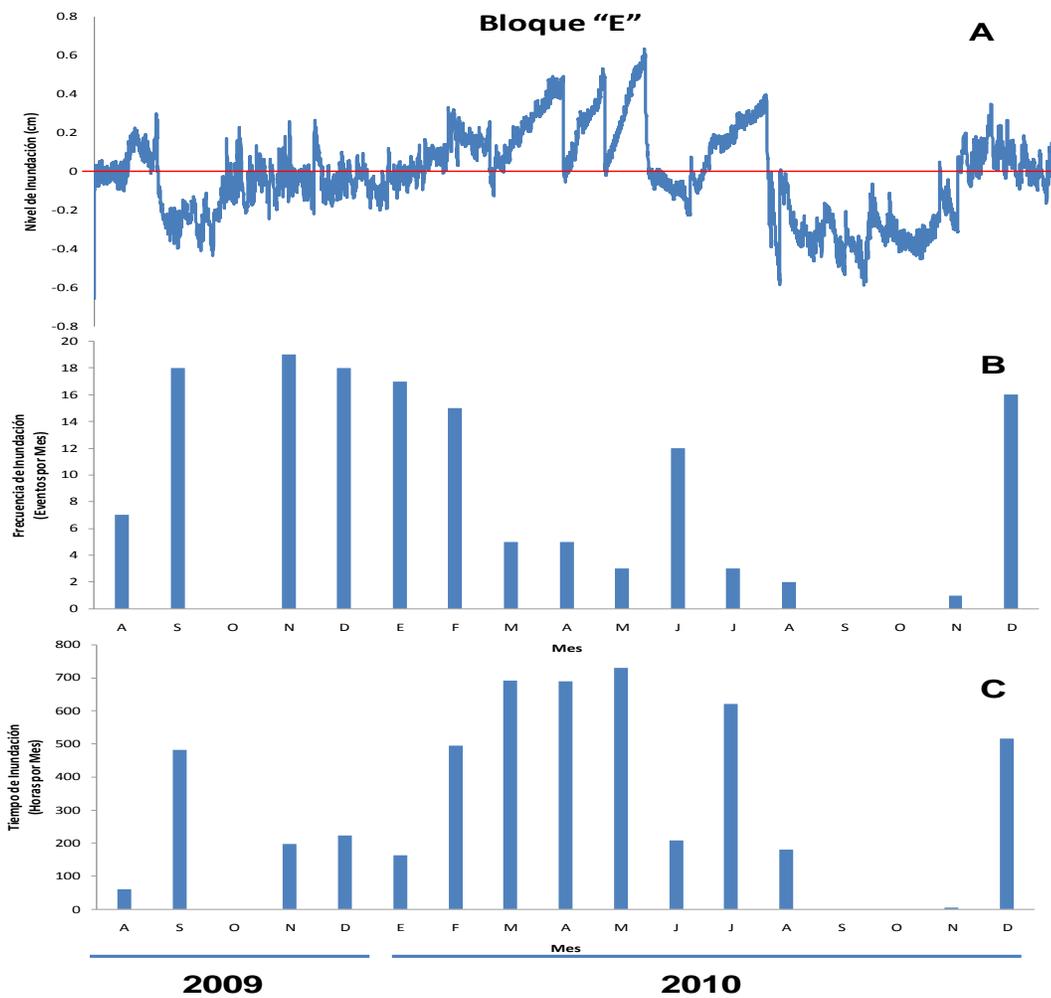


Figura 52. Nivel de inundación, tiempo de inundación y frecuencia de inundación en el Bloque “E” de la zona de rehabilitación de la localidad de Celestún.

El bloque “F” de la localidad de Celestún corresponde a un sitio donde no se ha llevado a cabo ninguna obra de rehabilitación, por lo que representa un sitio de referencia impactado.

Se observa que el mayor nivel de inundación fue en septiembre-2009 (20 cm) (Fig. 51-A), mientras que en agosto-2010 el sitio no se inundó (Fig. 51-A). En los meses de enero a mayo de 2010 se registró la mayor frecuencia de inundación (mayo 19e/mes) (Fig. 51-B). La menor frecuencia de inundación se presentó de octubre a diciembre de 2009 (4e/mes) (Fig. 51-B). En el mes de septiembre-2009 permaneció inundado más tiempo (274 hr/mes), seguido de febrero-2010 (256 hr/mes), siendo diciembre-2009 el mes que permaneció menos tiempo inundado (16 hr/mes), seguido de septiembre-2010 (17 hr/mes) (Fig. 51-C).

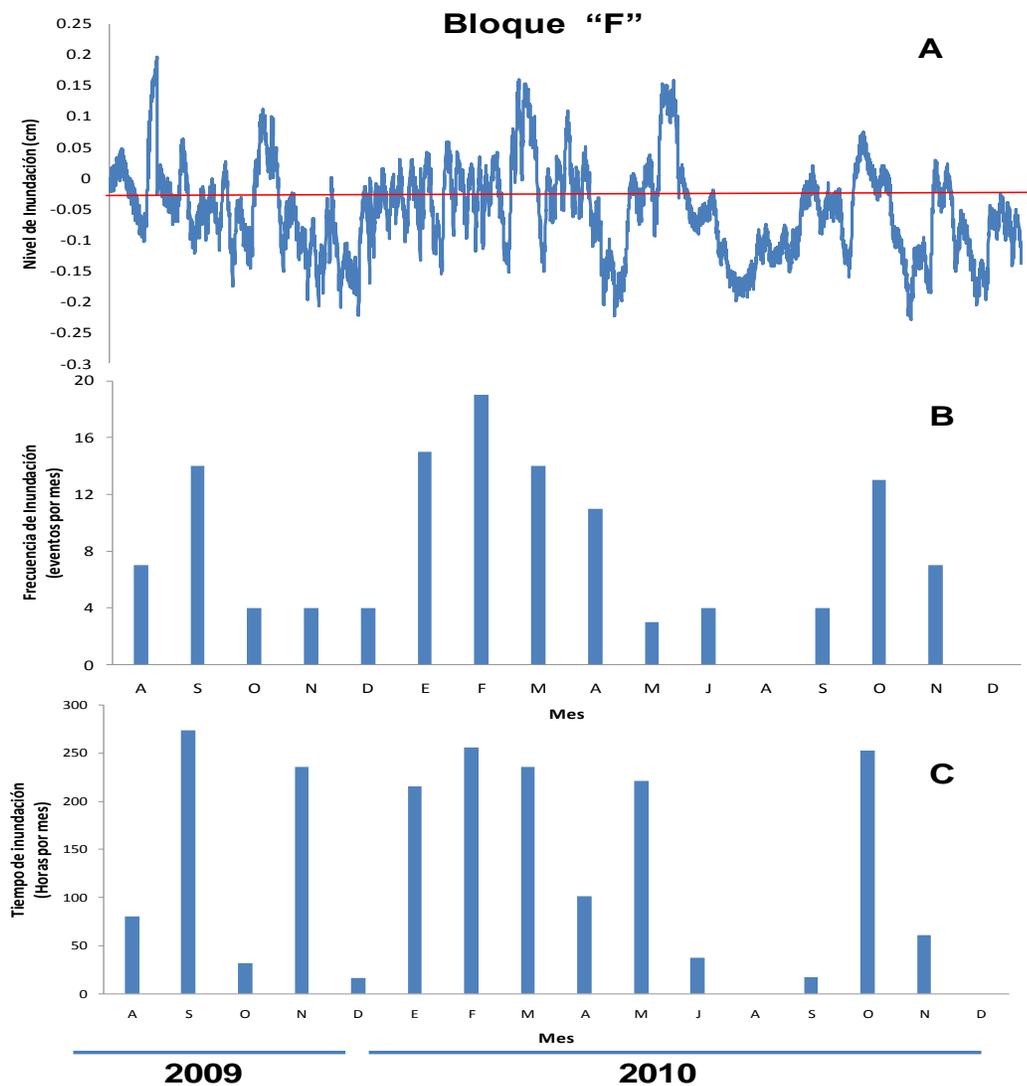


Figura 53. Nivel de inundación, tiempo de inundación y frecuencia de inundación del Bloque “F” de la zona de rehabilitación de la localidad de Celestún.

Temperatura y conductividad: La temperatura más alta se presentó en el mes de octubre-2009 (28 °C) (Fig. 54), la cual desciende hasta 24 °C durante los meses de enero a abril correspondientes a la temporada de nortes, aumentando a partir del mes de mayo. Con respecto a la conductividad, durante los meses de agosto a octubre del 2009 presenta su mayor valor (79500 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Fig. 54-B), el cual disminuye en los meses de enero a marzo de 2010 (77500 $\mu\text{S}/\text{cm}$), volviendo a aumentar de agosto a noviembre del 2010.

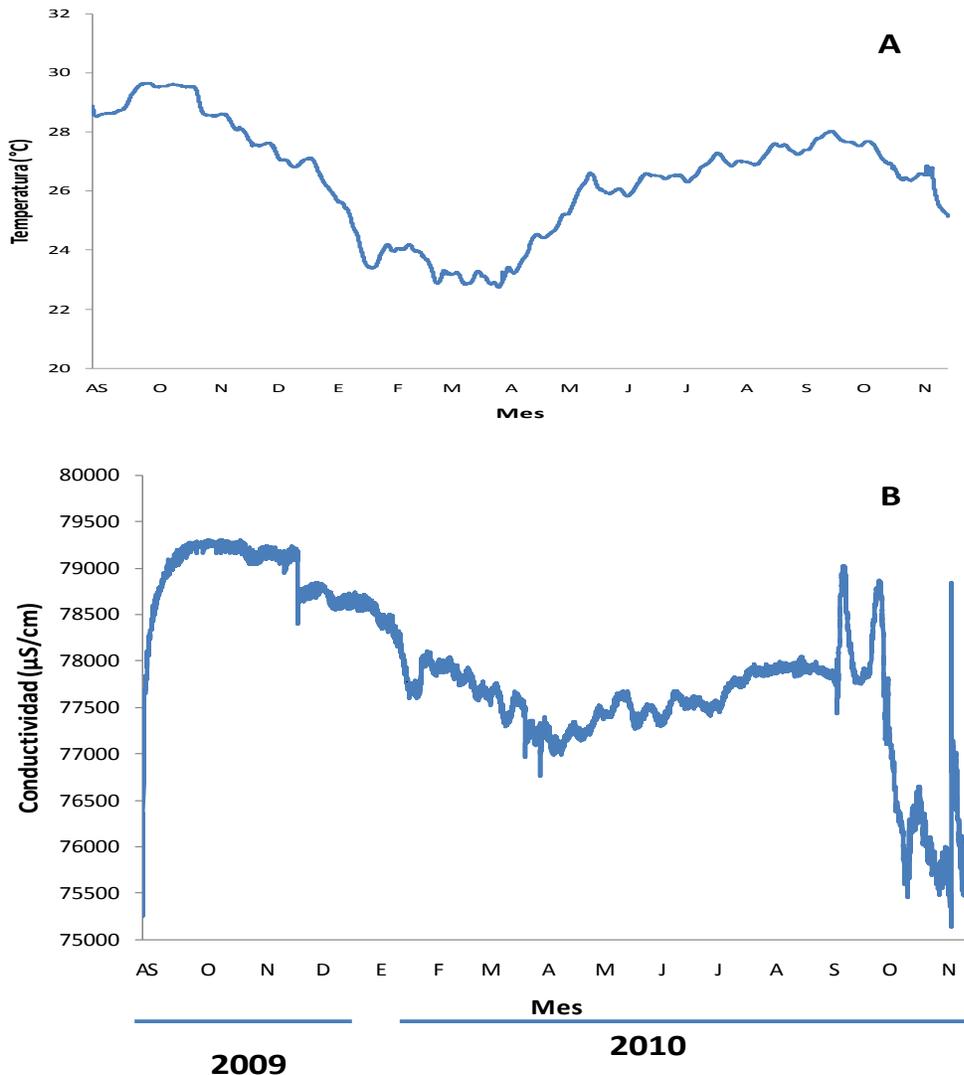


Figura 54. Temperatura y conductividad del Bloque "E" de la zona de rehabilitación de la localidad de Celestún.

La temperatura en canal del bloque “E” es mayor en los meses de agosto a octubre del 2009 (29 °C) (Fig. 55-A). La temperatura empieza a descender en mes de noviembre-2009 (27 °C) hasta el mes de Abril-2009 lo que corresponde a la temporada de nortes, volviendo a aumentar de mayo a agosto-2010 (Fig. 55-A), y descendiendo hasta 22 °C en septiembre. Con respecto a la conductividad esta se mantiene en 75000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de agosto-2009 a Febrero-2010 (Fig. 55-B), descendiendo hasta 35000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Fig. 55-B), aumenta nuevamente durante los meses de mayo a junio (75000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Este resultado podría indicar que el efecto de reducir la salinidad de la zona de rehabilitación por efecto de la inundación por el canal construido llevó casi 8 meses. Este análisis está en proceso de experimentación por las sensibilidad de los sensores, por lo que habría que continuar el monitoreo.

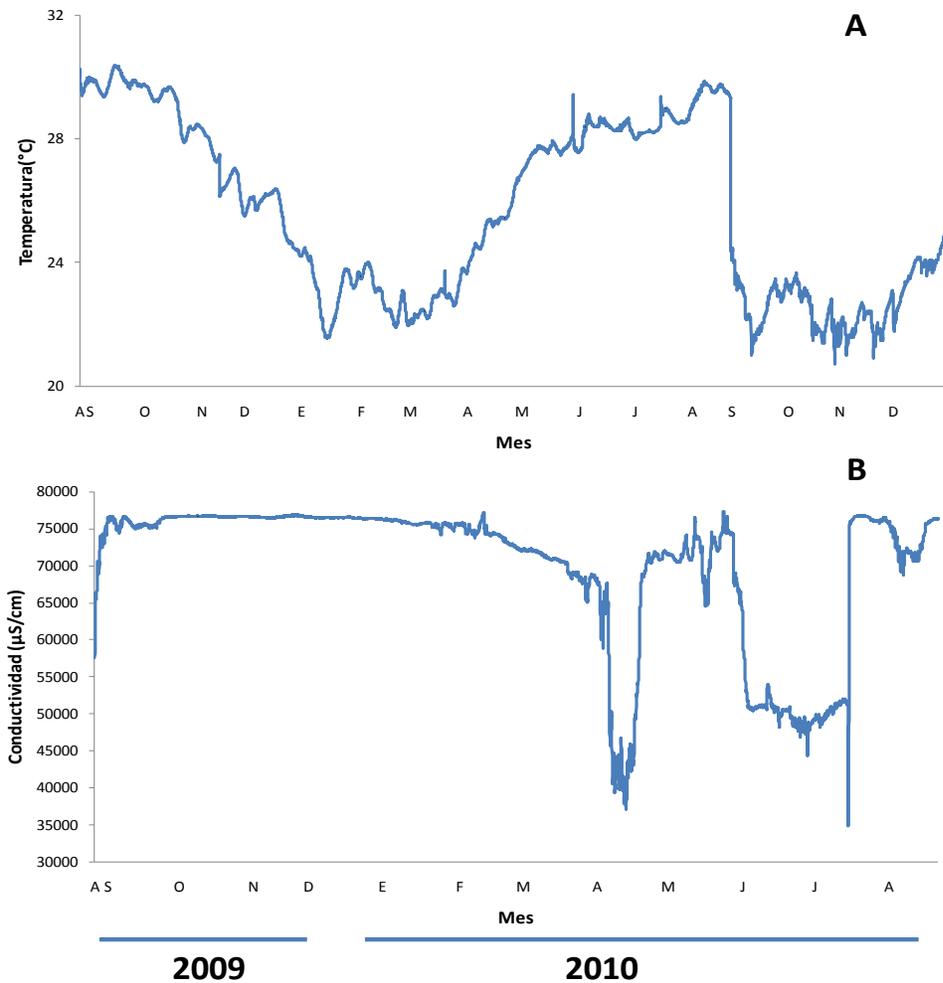


Figura 55. Temperatura y conductividad del canal presente en el Bloque “E” de la zona de rehabilitación de la localidad de Celestún.

En el bloque “F” el modelo de “level logger” que se instaló solo midió la temperatura. en este sitio. La mayor temperatura se presenta en los meses de agosto a noviembre de 2009 (31 a 32 °C), descendiendo a partir de noviembre hasta la temperatura más baja que se presentó en el mes de enero-2010 (22 °C) (Fig. 56). La temperatura sigue el patrón estacional del clima dominante en la zona de estudio.

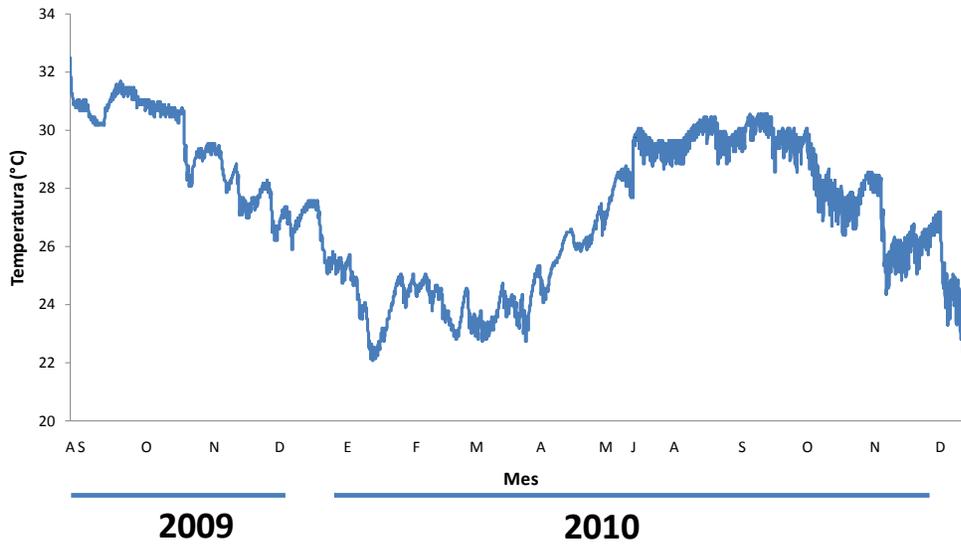


Figura 56. Temperatura del Bloque “F” de la zona de rehabilitación de la localidad de Celestún.

IX.2 Hidroperiodo Progreso

Se instalaron dos medidores continuos de presión, temperatura y conductividad: uno en el canal de acceso que comunica el área de rehabilitación con laguna Chelem y otro en el área de rehabilitación. La frecuencia de registro se programó para mediciones cada hora desde su instalación hasta la fecha. Con la serie de datos registrados se calculó el tiempo de inundación que se define como las horas/mes en la cual el suelo está inundado independiente de la altura de la columna de agua; el nivel de inundación que son los valores máximos positivos o negativos referente a un nivel cero que es el suelo, y por último la frecuencia de inundación mensual que se define por el número de inundaciones después de un periodo de vaciante de la columna de agua referente al nivel de suelo y que es independiente al nivel de la columna de agua.

En el sitio de rehabilitación de puerto Progreso el intervalo de variación del nivel de inundación fue de hasta 50 cm. El menor nivel de agua fue de -25 cm y la máxima de 50 cm (Fig. 57). Para el caso del sitio de rehabilitación la variación fue similar a los registrados en el canal. En ambos sitios permanece la mayoría del tiempo con inundación superficial. De septiembre a enero el sitio de rehabilitación permanece permanentemente inundado, también durante este período se presentó el máximo nivel de inundación promedio de 31 cm. En el período de los meses de febrero a agosto se presentó una combinación de periodos secos e inundados. La frecuencia de inundación por mes estuvo entre 4 y 12 inundaciones por mes (Fig. 57).

Referente al comportamiento del hidroperíodo en el sitio del canal, el comportamiento de la variación fue hasta los 60 cm de inundación. Se presentó alta relación en el comportamiento de los niveles entre el canal y el sitio de rehabilitación (Fig. 57). El menor nivel de agua de inundación promedio fue de -50 cm durante el mes de febrero y la máxima de 60 cm. En todo el período de muestreo el canal se mantuvo con inundación, excepto en el mes de febrero en donde el canal llegó a permanecer sin agua. La constante inundación del canal representa la funcionalidad de la acción de restauración para mantener húmedas las zonas aledañas de los canales. En el mes de febrero se presentó la mayor frecuencia de inundaciones con 3 por mes. Los demás meses presentaron variaciones en los niveles de agua (entre 20 y 60 cm). El comportamiento del hidroperíodo del mes de febrero podría estar relacionado con la variación climática de nortes (frentes polares) que entre uno de sus efectos es disminuir los niveles de marea por efecto de los vientos (Fig. 57).

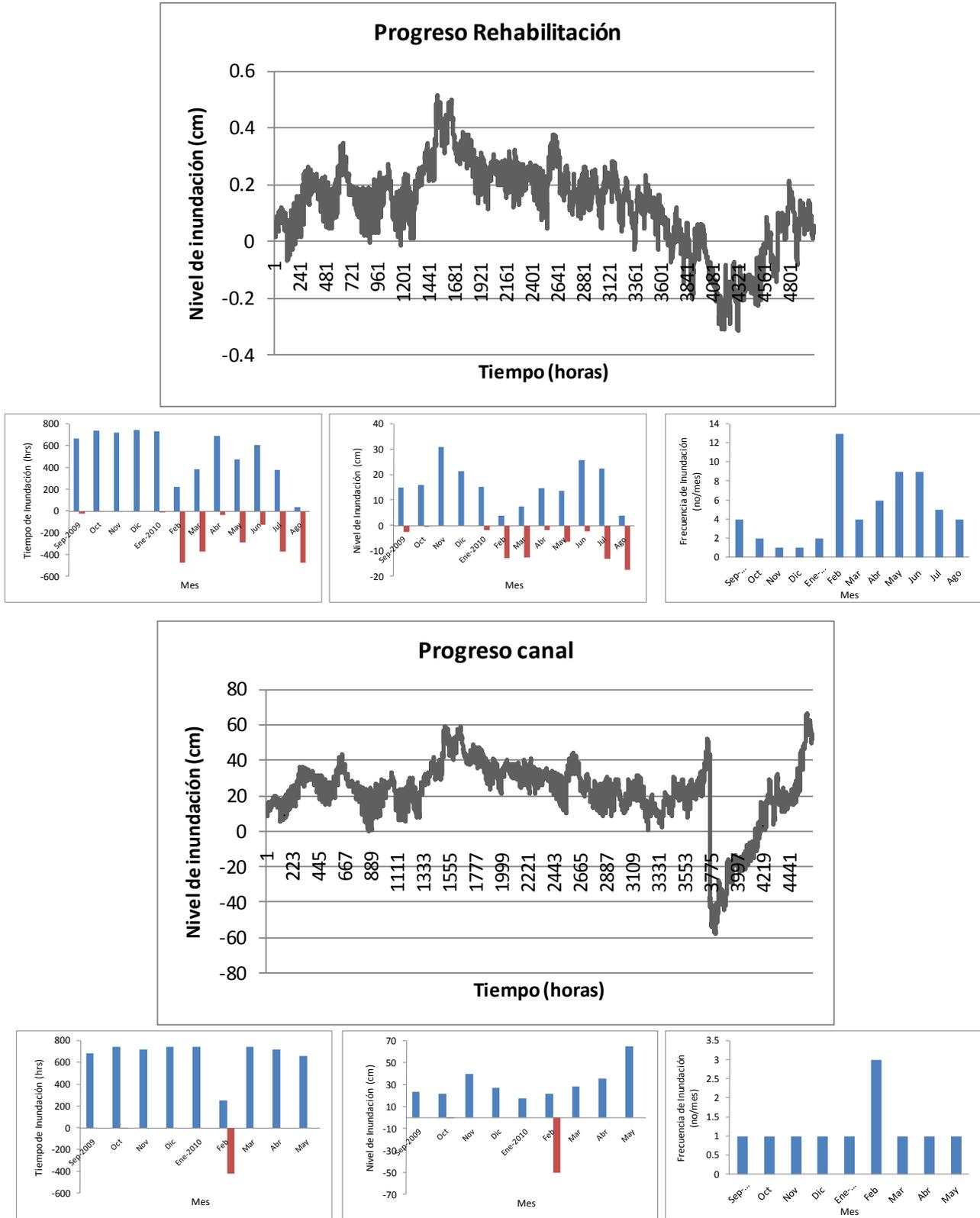


Figura 57. Variación de los niveles de inundación en un periodo de tiempo de 4800 horas de observaciones en Puerto Progreso.

Respecto al comportamiento de la temperatura del agua, presenta el mismo comportamiento entre el canal y el sitio de rehabilitación, aunque el intervalo de variación para el canal fue de 18 °C a 29.8 °C y en el sitio de rehabilitación fue entre 21°C y 30 °C (Fig. 58). Nuevamente se observa que al igual que Celestún el comportamiento de la temperatura esta en relación con la temperatura ambiente. El decremento de la temperatura registrado se asocia a la temporada de nortes de la región, ya que los frentes polares disminuyen la temperatura ambiente hasta <23 °C. Los cambios de la temperatura indican entrada de agua lagunar con temperaturas menores.

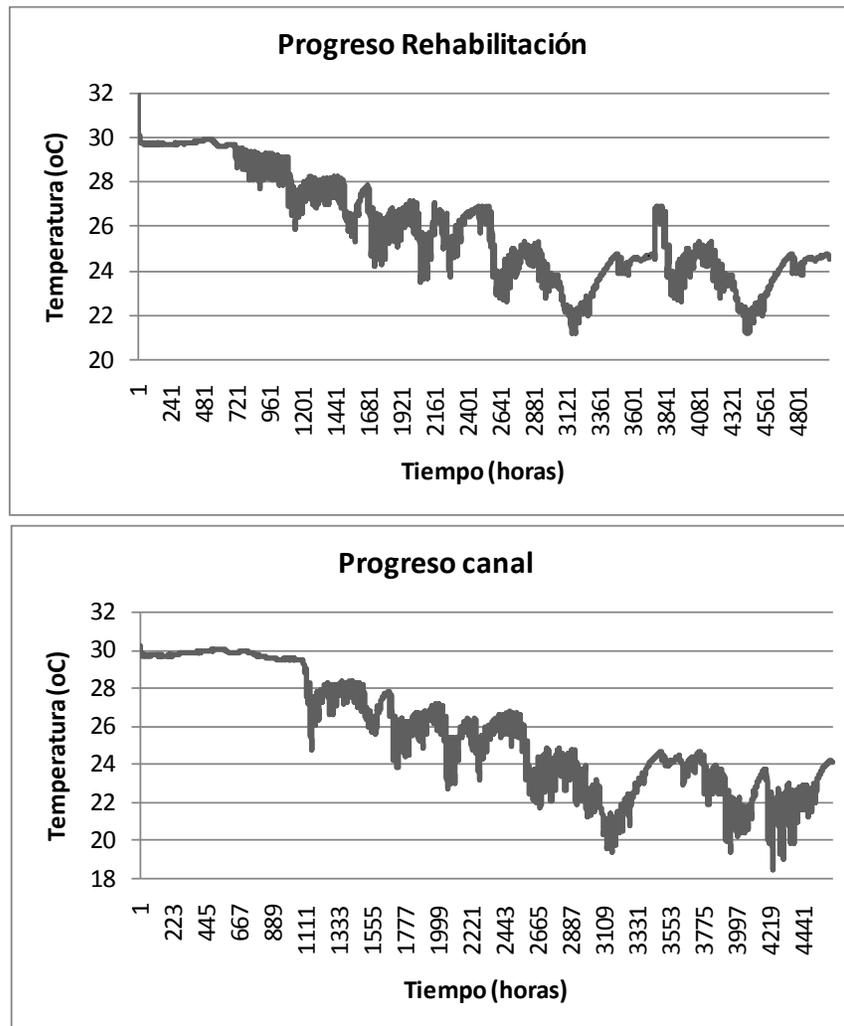


Figura 58. Variación de la temperatura en un periodo de tiempo de 4800 horas de observaciones en Puerto Progreso.

Las conductividades de Puerto Progreso fueron mayores en el sitio de rehabilitación hasta con valores de 72-83 mS/cm. El decremento en la conductividad hasta 71 mS/cm fue como resultado de precipitaciones. Por otra parte el sensor del canal registró valores constantes entre 77 y 82 mS/cm, el efecto de la precipitación no es identificado en el comportamiento del agua lagunar de Chelem (Fig. 59). La variación de conductividad del sensor en el canal tiene el efecto de las entradas de agua de laguna Chelem a través de las mareas diarias. Por otra parte en el caso de sitio de rehabilitación la variación de la conductividad es resultado de la acumulación del agua tanto superficial durante las lluvias como del efecto de las mareas que tiene su entrada a través de los canales desazolvados (Fig. 59).

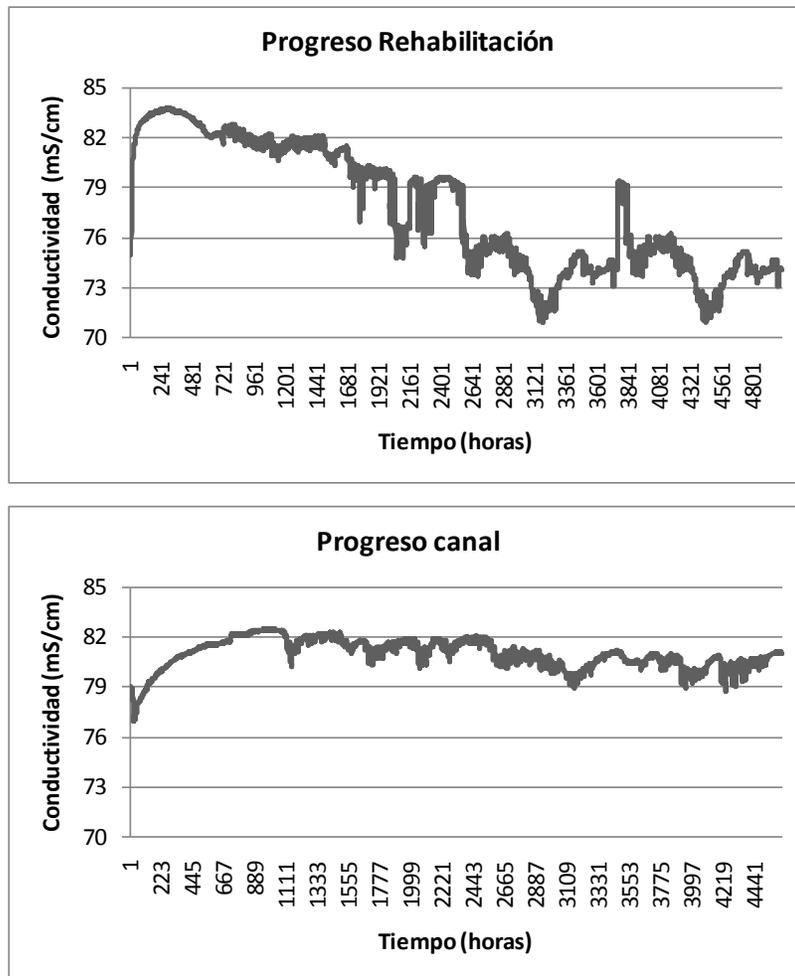


Figura 59. Variación de la conductividad en un periodo de tiempo de 4800 horas de observaciones en Puerto Progreso.

X.COSTOS DE LA REHABILITACIÓN

Uno de los aspectos que en muy pocas ocasiones se evalúa y se considera en los proyectos de restauración son los costos de lo que ello implica. El contexto experimental de este proyecto permitió hacer una evaluación general de los costos de la restauración considerando los componentes de:

-Caracterización del sitio: que incluyó todas las actividades de salidas de muestreo, análisis de laboratorio (materiales y reactivos), honorarios de los técnicos participantes en los trabajos de campo y análisis de la información.

-Obras y acciones: fue considerado todos los pagos de los jornales y subsidios a los grupos de cada comunidad que participó directamente en las acciones de restauración (construcción, desazolve y mantenimiento de canales de marea, así como construcción de manantiales). También se consideró los costos de materiales utensilios usados en las acciones (madera, palas, azadones, tubos, etc.).

En Celestún participaron 156 personas de la comunidad y en puerto Progreso 95 personas de la comunidad de Chelem. En todos los casos, los grupos de hombres y mujeres se sustentan de actividades pesqueras y domésticas.

-Monitoreo: Consistió en todas las actividades de seguimiento de las variables indicadoras de éxito establecidas en este modelo de restauración, las cuales permitirán proponer nuevas acciones o adecuación de las ya hechas bajo el esquema de manejo adaptativo. Este rubro también incluye los honorarios de los técnicos participantes en estas acciones.

-Asesoría: Consiste en el tiempo horas hombre que expertos y técnicos invierten en planeación, ejecución y supervisión del proyecto, así como en la capacitación de los grupos involucrados. En este caso se capacito al grupo de pescadores y amas de casa que participaron en la las acciones, así como a técnicos y personal de la CONANAP (para Celestún) y de SEMARNAT (para Progreso).

Otro componente que debería incluirse en el análisis pero no es fácil de estimar, se refiere a la depreciación del equipo utilizado para los análisis de agua y sedimentos, por lo no están considerados costos de inversión para la caracterización y monitoreo. Ambos componentes demostraron que son clave para aumentar las probabilidades de éxito de un proyecto de esta naturaleza.

ANALISIS FINANCIERO "CURVA YUCALPETEN, PUERTO PROGRESO"

CONCEPTO	RECURSOS CONABIO	OTRAS APORTACIONES (SEMARNAT y CINVESTAV)	COSTO GENERAL	COSTO POR HECTAREA POR 2 AÑOS PARA (15 ha)
Caracterización ambiental	\$120,000.00	\$200,000.00	\$320,000.00	\$21,333.33
Obras y acciones	\$214,801.73	\$124,584.00	\$339,385.73	\$22,625.72
Monitoreo	\$110,000.00		\$110,000.00	\$7,333.33
Asesoría de expertos		\$160,000.00	\$160,000.00	\$10,666.66
Total	444,801.73	\$484,584.00	\$929,385.73	\$61,959.04

ANALISIS FINANCIERO "CELESTUN"

CONCEPTO	RECURSOS CONABIO	OTRAS APORTACIONES (CONAFOR, SEMARNAT y CINVESTAV)	COSTO GENERAL	COSTO POR HECTAREA POR 2 AÑOS PARA (30 ha)
Caracterización ambiental	\$190,000.00	\$200,000.00	\$390,000.00	\$13,000.00
Obras y acciones	\$393,001.73	\$848,716.00	\$1,241,717.73	\$41,390.59
Monitoreo	\$190,000.00		\$190,000.00	\$6,333.00
Asesoría de expertos		\$315,000.00	\$315,000.00	\$10,500.00
Total	\$773,001.73	\$1,363,716.00	\$2,136,717.73	\$71,223.59

Como se puede observar en las tablas de arriba, los costos varían entre aproximadamente \$61,959.04 y \$71,223.59 M.N. por hectárea cada dos años, con un éxito de mejoramiento hidrológico de 100% en Celestún y del 90% en Progreso. No se omite mencionar que en este último sitio las condiciones de nivel topográfico y características de los sedimentos son muy desfavorables para el establecimiento y crecimiento del manglar. La regeneración natural a través del establecimiento de plántulas ha demostrado tener éxito a un año de terminadas las principales acciones, con el 70% del área en Celestún y del 40% en Progreso.

Estas conclusiones solo fueron posibles a través del monitoreo y seguimiento de la restauración. En este sentido el costo-beneficio de la restauración a través de acciones de rehabilitación hidrológica puede considerarse como exitoso. Por otra parte, como se menciona desde el planteamiento de la propuesta, este estudio fue concebido con un enfoque experimental, ahora sería pertinente dar seguimiento a las trayectorias de recuperación del manglar, ya que estas demostraron ser sitio-específicas.

Para el caso de Puerto Progreso, a pesar de que la regeneración natural fue menor al 50 %, se pudo determinar a través del monitoreo que el área de rehabilitación hidrológica incremento hasta un 50% más que las expectativas de un principio. En este caso el área de rehabilitación hidrológica paso de 7.5 ha planteado en un principio a 15 ha al final de la restauración. Esto confirma el costo-beneficio (25 ha/año) para acciones de rehabilitación hidrológica respecto a otras estrategias como la reforestación.

Otro aspecto importante de éxito es el involucramiento social en las acciones de restauración. Los grupos locales no solo recibieron un significativo subsidio para el beneficio de sus familias, si no que adquirieron y mostraron interés en mantener las acciones de restauración en otros sitios de para el futuro. Tal es el caso de Puerto progreso en donde el 90% de las personas involucradas fueron mujeres de la propia comunidad de Chelem, que al final de la acciones de la restauración se nombraron restauradores de manglares.

Un aspecto que hay que considerar y que en este proyecto no repercutió en los costos, es la accesibilidad al sitio (por tierra o por agua), y la distancia del sitio de restauración respecto a la localidad de donde es originario el grupo de personas que llevaron a cabo las acciones. Los costos que se deben contemplar son los de desplazamiento (vehículo terrestre y acuático).

En otras partes del mundo los costos de restauración, principalmente destinados a la reforestación han variado entre \$300 US/ha/año y 23,000 US/ha/año en Tailandia y E.U.A., respectivamente, con un promedio de al menos 5 años de intervención por el bajo éxito de supervivencia.

En la revisión de la literatura al respecto, no se pudieron encontrar datos concretos de los costos de restauración de manglares por rehabilitación hidrológica. Se sabe de casos con éxito discutible (Colombia, Ciénega Grande de Santa Marta), pero no hay costos asociados al éxito de la rehabilitación hidrológica. La mayor parte de la información disponible se refiere a reforestaciones.

XI. CONSIDERACIONES FINALES

-Las acciones de rehabilitación y monitoreo de indicadores de éxito que se realizaron durante el período de este proyecto en cada una de las localidades son:

Celestún:

*-Se acondicionaron las áreas hipersalinas (2 x 10m) para reforestación como centros de dispersión y fueron sembradas plántulas de *Laguncularia racemosa*, y propágulos de *Rhizophora mangle*. La mortalidad fue del 100%, indicando que las condiciones no eran apropiadas para esta estrategia en el momento que se llevaron a cabo. Por la relación costo beneficio, no se realizó una segunda siembra. Sin embargo, de acuerdo a los resultados del último muestreo las condiciones de salinidad intersticial son más favorables actualmente, por lo que se recomienda se lleva a cabo esta estrategia.*

-Se construyeron más de los 400 metros de canal principal comprometidos y se les dio mantenimiento en dos ocasiones al canal principal y también en dos ocasiones a los canales secundarios.

-Se construyeron los 4 manantiales comprometidos.

-Se seleccionaron los sitios para la colecta de semillas y plántulas que se sembraron en los centros de dispersión.

-Se llevó a cabo el monitoreo de la salinidad intersticial, supervivencia y crecimiento de las plántulas.

-Se instalaron los medidores de nivel de agua y salinidad, y se descargó la información para determinar el hidropериодо y la conectividad entre los flujos de agua que entran al humedal y su respuesta en inundación. Algunos de los instrumentos sufrieron daño por corrosión. Se enviaron al fabricante para el rescate de los datos, y estamos en la espera de esos resultados.

-Se ha monitoreado la productividad de los sitios de referencia que servirá como información de largo plazo en las curvas de funcionamiento.

-Se llevó a cabo el monitoreo fotográfico (se anexan archivos digitales al informe final).

-Se llevaron muestreos iniciales y finales de variables ambientales y biológicas comprometidas (se anexa archivo digital).

Para esta localidad se recomienda:

*-Continuidad al programa de monitoreo con énfasis en salinidad intersticial, establecimiento y crecimiento de plántulas por especie y por sitio. Adicionar a los muestreos cobertura y biomasa de especies pioneras como *Batís sp.* y *Salicornia sp.**

-Continuidad al monitoreo del hidropериодо, y usar la información de la topografía e inundación para desarrollar un modelo de balance de agua.

-Estudiar la contribución de la restauración de manglares para mejorar o recuperar servicios ambientales. Como ejemplo, biodiversidad, captura C, protección de costas, entre otros.

PUERTO PROGRESO:

-Se eliminaron materiales de relleno y escombros que interrumpían el flujo hidrológico en los canales naturales de inundación.

-Se construyeron más de los 200m canal principal y más de 200m de canales secundarios comprometidos y se le dio mantenimiento en dos ocasiones al canal principal y una a los secundarios.

-Se construyeron 2 manantiales para introducir agua dulce y reducir la salinización de los sedimentos.

*-Se acondicionaron las áreas hipersalinas (2 x 10m) para reforestación como centros de dispersión y fueron sembrados propágulos de *Rhizophora mangle*. Se manejaron 4 niveles topográficos (0, 10, 20 y 30 cm de elevación respecto al nivel medio de marea. La mortalidad fue del 100%, indicando que las condiciones no eran apropiadas para esta estrategia en el momento que se llevaron a cabo. Por la relación costo beneficio, no se realizó una segunda siembra. Sin embargo, de acuerdo a los resultados del último muestreo las condiciones de salinidad intersticial son más favorables actualmente, por lo que se recomienda se lleva a cabo esta estrategia.*

-Se seleccionaron los sitios para la colecta de semillas y plántulas que fueron sembradas en los centros de dispersión.

-Se llevó a cabo el monitoreo de la salinidad intersticial, supervivencia y crecimiento de las plántulas.

-Se instalaron los medidores de nivel de agua y salinidad, y se descargó la información para determinar el hidropериodo y la conectividad entre los flujos de agua que entran al humedal y su respuesta en inundación. Algunos de los instrumentos sufrieron daño por corrosión. Se enviaron al fabricante para el rescate de los datos, y estamos en la espera de esos resultados.

-Se monitoreo la productividad de los sitios de referencia que servirá como información de largo plazo en las curvas de funcionamiento.

Para esta localidad se recomienda:

-Continuidad al programa de monitoreo con énfasis en la salinidad intersticial, establecimiento y crecimiento de plántulas por especie y por sitio.

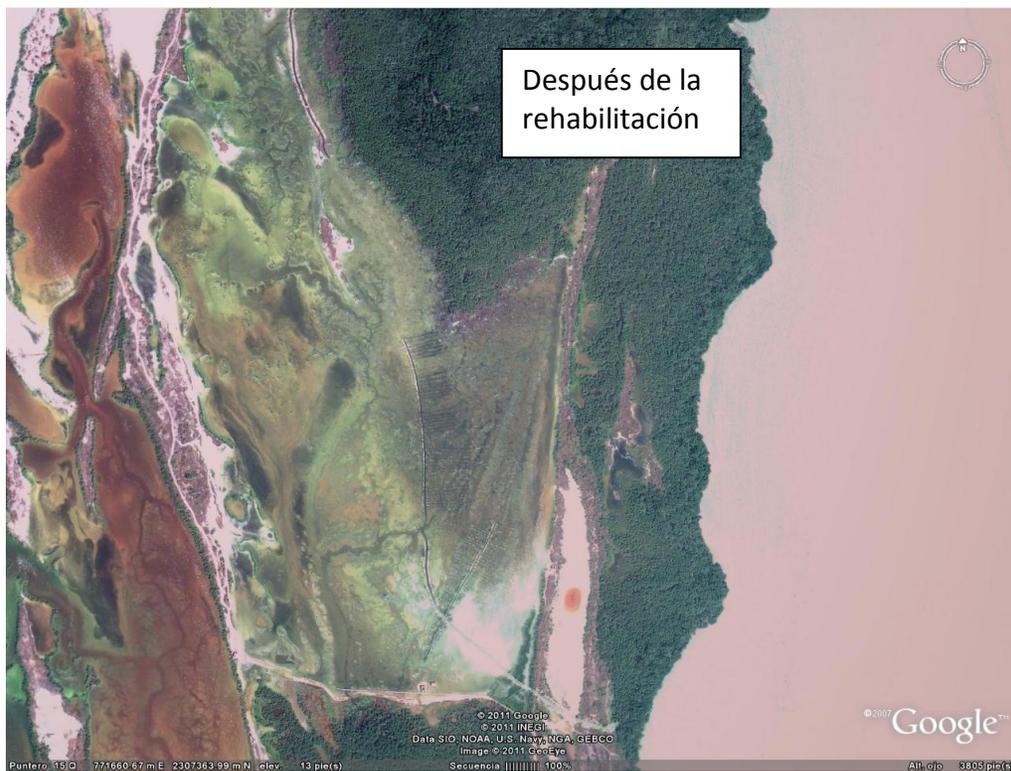
-Continuidad al monitoreo del hidropериodo, y usar la información de la topografía e inundación para desarrollar un modelo de balance de agua.

-Llevar a cabo otras acciones (barbecho) para facilitar el establecimiento de plántulas. Se ha observado que hay una costra de sedimento-sal que le dificulta a las raíces de las plántulas establecerse.

-Volver a experimentar la reforestación en los centros de dispersión pero con las tres especies.

ANEXO 1

Se presentan imágenes Google en las que se pueden observar los canales construidos y los cambios en el paisaje de ambas localidades:





Antes de la rehabilitación



Después de la rehabilitación