

RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE LA LAGUNA DE BOJÓRQUEZ, BENITO JUÁREZ, QUINTANA ROO. Proyectos Ramo 16, para el 2011

5.2 SUPERVISIÓN DE ACCIONES Y DESARROLLO DE HERRAMIENTA DE SOPORTE PARA GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE RESTAURACIÓN ECOLÓGICA.

Informe Final

CLAVE IMTA: HC-1110.2

**COORDINACION DE HIDRÁULICA
SUBCOORDINACIÓN DE HIDRÁULICA AMBIENTAL
SUBCOORDINACIÓN DE HIDRÁULICA URBANA**

Participantes:
Ariosto Aguilar Chávez
Pedro Misael Albornoz Góngora
Víctor Hugo Alcocer Yamanaka
Jorge Armando Laurel Castillo
Víctor Guillermo Mejía Astudillo
Rubén Antelmo Morales Pérez

Marzo 2012

Índice

5.2	MODELACIÓN NUMÉRICA.....	6
5.2.1	Introducción	6
5.2.2	Base de datos	7
5.2.2.1	Mareas	7
5.2.2.2	Batimetría	7
5.2.3	Mediciones de parámetros físicos en el sistema lagunar	10
5.2.3.1	Resultados de temperatura y salinidad	14
5.2.3.2	Variación temporal del nivel de la superficie libre del agua, temperatura y salinidad 20	
5.2.3.3	Corrientes en la boca de la isla Pok-ta-pok	22
5.2.4	Modelación numérica de la hidrodinámica	24
5.2.5	Hidrodinámica en condiciones actuales	25
5.2.5.1	Mareas muertas.....	30
5.2.5.2	Mareas vivas	33
5.2.5.3	Tiempo de residencia	36
5.2.6	Hidrodinámica en condiciones de proyecto. Escenario 1: Canal de 6 m de ancho con 2.5 m de profundidad.	36
5.2.6.1	Mareas muertas.....	37
5.2.6.2	Mareas vivas	40
5.2.6.3	Tiempo de residencia	42
5.2.7	Hidrodinámica en condiciones de proyecto. Escenario 2: Canal de 10 m de ancho con 2.5 m de profundidad.....	43
5.2.7.1	Mareas muertas.....	44
5.2.7.2	Mareas vivas	47
5.2.7.3	Tiempo de residencia	49
5.2.8	Comparación cualitativa entre los escenarios de simulación	50
5.2.9	Conclusiones.....	55
	Referencias	56
5.3	EVALUACIÓN DE LOS AIREADORES PROPUESTOS POR EL GOBIERNO DEL ESTADO.....	57
5.3.1	Antecedentes	57
5.3.2	Ubicación	58
5.3.3	Delimitación Física	58
5.3.4	Sistema de aeración-circulación Solar Bee	58

5.3.5	Aplicación de los equipos SolarBee©	59
5.3.6	Estudio de evaluación de los equipos Solar	60
5.3.7	Medición de corrientes en la laguna de Bojorquez (IMTA, 2011)	63
5.3.8	Conclusiones	65
	Referencias	66

Lista de Figuras

Figura 5.2.1 Batimetría para Quintana Roo y Parte de Yucatán. Modificado de GEBCO (2009)	8
Figura 5.2.2 Batimetría cercana a Cancún, Quintana Roo. Modificado de SEMAR (2001) ..	9
Figura 5.2.3 Batimetría del sistema lagunar Bojórquez-Nichupté. Modificado de IMTA(2001).....	10
Figura 5.2.4 Perfilador doppler con baterías listo para ser anclado en el canal norte de entrada a la laguna de Bojorquez.....	11
Figura 5.2.5 Perfilador doppler lateral SL de 3 MHz instalado en la entrada del canal sur de la laguna de Bojórquez en Cancún, QR	12
Figura 5.2.6 CTD CastAway utilizado para las mediciones en la laguna de Nichupte y Bojórquez en Cancún, Q.R.....	13
Figura 5.2.7 Mapa esquemático de los lances de CTD en la laguna de Nichupté y Bojórquez en Cancún, QR.....	14
Figura 5.2.8 Perfiles de temperatura medidos por el CTD en la laguna de Nichupte y Bojórquez en Cancún, QR.....	15
Figura 5.2.9 Perfiles de salinidad medidos por el CTD en la laguna de Nichupte y Bojórquez en Cancún, QR.....	16
Figura 5.2.10 Mapa esquemático de los lances de CTD en la laguna de Bojórquez el 21 de diciembre de 2011.	17
Figura 5.2.11 Perfiles de temperatura medidos por el CTD en la laguna de Bojórquez el 21 de diciembre de 2011.	18
Figura 5.2.12 Perfiles de salinidad (ups) medidos por el CTD en la laguna de Bojórquez el 21 de diciembre de 2011.	19
Figura 5.2.13 Serie de tiempo de los datos de temperatura y nivel de la laguna en la parte central de la laguna de Nichupté.	20
Figura 5.2.14 Serie de tiempo de los datos de temperatura nivel y salinidad en la boca sur de la laguna de Bojórquez.	21
Figura 5.2.15 Serie de tiempo de los datos de temperatura nivel y salinidad en la boca sur de la laguna de Bojórquez.	22
Figura 5.2.16 Variación de velocidades en la boca sur.	23
Figura 5.2.17 Vista global de la discretización de dominio de cálculo. Modificado de Google Earth.....	26
Figura 5.2.18 Malla sobre el sistema lagunar Nichupté-Bojórquez.....	27
Figura 5.2.19 Detalle de la malla en la Laguna de Bojórquez.	28
Figura 5.2.20 Señal de marea simulada en las bocas de los canales Sigfrido y Nizúc (tiempo GMT-6:00).	29
Figura 5.2.21 Comparación del nivel de la superficie libre del agua medido y simulado en el Canal Sigfrido. (tiempo GMT-6:00).	29
Figura 5.2.22 Comparación del nivel de la superficie libre del agua medido y simulado en el canal Pok-ta-pok norte (tiempo GMT-6:00).....	30
Figura 5.2.23 Comparación del nivel de la superficie libre del agua medido y simulado en el Canal Nizúc (tiempo GMT-6:00).	30

Figura 5.2.24 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 02/Dic/2011 00:00 hr (tiempo GMT).	31
Figura 5.2.25 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 02/Dic/2011 07:00 hr (tiempo GMT).	32
Figura 5.2.26 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 04/Dic/2011 20:00 hr (tiempo GMT).	32
Figura 5.2.27 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 05/Dic/2011 03:00 hr (tiempo GMT).	33
Figura 5.2.28 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 21/Dic/2011 21:30 hr (tiempo GMT).	34
Figura 5.2.29 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 22/Dic/2011 05:00 hr (tiempo GMT).	34
Figura 5.2.30 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 22/Dic/2011 23:00 hr (tiempo GMT).	35
Figura 5.2.31 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 23/Dic/2011 06:00 hr (tiempo GMT).	35
Figura 5.2.32 Volúmenes de entrada y salida en la laguna de Bojórquez. Condición actual.	36
Figura 5.2.33 Vista de la malla para laguna de Bojórquez y el canal de comunicación.	37
Figura 5.2.34 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 02/Dic/2011 00:00 hr (tiempo GMT).	38
Figura 5.2.35 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 02/Dic/2011 07:00 hr (tiempo GMT).	38
Figura 5.2.36 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 04/Dic/2011 20:00 hr (tiempo GMT).	39
Figura 5.2.37 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 05/Dic/2011 03:00 hr (tiempo GMT).	39
Figura 5.2.38 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 21/Dic/2011 21:30 hr (tiempo GMT).	40
Figura 5.2.39 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 22/Dic/2011 05:00 hr (tiempo GMT).	41
Figura 5.2.40 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 22/Dic/2011 23:00 hr (tiempo GMT).	41
Figura 5.2.41 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 23/Dic/2011 06:00 hr (tiempo GMT).	42
Figura 5.2.42 Volúmenes de entrada y salida en los canales de Pok-ta-pok e isla dorada.	42
Figura 5.2.43 Volúmenes de entrada y salida en el canal de 6 m.	43
Figura 5.2.44 Vista en perspectiva de la ubicación del canal de 10 m. (Modificado de Google Earth)	44
Figura 5.2.45 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 02/Dic/2011 00:00 hr (tiempo GMT).	45
Figura 5.2.46 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 02/Dic/2011 07:00 hr (tiempo GMT).	45

Figura 5.2.47 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 04/Dic/2011 20:00 hr (tiempo GMT).	46
Figura 5.2.48 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 05/Dic/2011 03:00 hr (tiempo GMT).	46
Figura 5.2.49 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 21/Dic/2011 21:30 hr (tiempo GMT).	47
Figura 5.2.50 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 22/Dic/2011 05:00 hr (tiempo GMT).	48
Figura 5.2.51 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 22/Dic/2011 23:00 hr (tiempo GMT).	48
Figura 5.2.52 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 23/Dic/2011 06:00 hr (tiempo GMT).	49
Figura 5.2.53 Volúmenes de entrada y salida en los canales de Pok-ta-pok e isla dorada.	50
Figura 5.2.54 Volúmenes de entrada y salida en el canal de 10 m.	50
Figura 5.2.55 Comparación de velocidades en condiciones actuales y de proyecto (canal de 10 m). 23/Dic/2011 06:00 hr (tiempo GMT).	51
Figura 5.2.56 Ubicación de puntos de comparación entre alternativas.	51
Figura 5.2.57 Comparación de velocidades en el punto 1.....	52
Figura 5.2.58 Comparación de velocidades en el punto 2.....	52
Figura 5.2.59 Comparación de velocidades en el punto 3.....	52
Figura 5.2.60 Comparación de velocidades en el punto 4.....	53
Figura 5.2.61 Comparación de velocidades en el punto 5.....	53
Figura 5.2.62 Comparación de velocidades en el punto 6.....	53
Figura 5.2.63 Comparación de velocidades en el punto 7.....	54
Figura 5.2.64 Comparación de velocidades en el punto 8.....	54

5.2 MODELACIÓN NUMÉRICA

5.2.1 Introducción

Desde la construcción de Cancún, el sistema lagunar Nichupté ha estado sometido a un constante deterioro ambiental. Rellenos como la isla Pok-ta-pok e isla dorada, los dragados, y la interrupción de una de sus comunicaciones con el mar caribe, han modificado totalmente la hidrodinámica del sistema (Próspero-Villan, 2001). Estas modificaciones antropogénicas al sistema lagunar han definido a la laguna de Bojórquez, la cual actualmente tiene una hidrodinámica inducida por marea muy pobre (Carbajal *et al*, 2009). La parte norte de la laguna es la zona más afectada, ya que su movimiento es prácticamente nulo, y durante época de estiaje emite olores desagradables muy fuertes que pueden percibirse en las zonas adyacentes de plaza caracol.

La afectación a la morfología de la laguna no ha sido la única causa de la condición de deterioro en la que actualmente se encuentra la laguna de Bojórquez. Desde 1992 la Conagua (Espinosa *et al*, 2010) reportó 17 sitios de descargas de aguas residuales directamente sobre la laguna de Bojórquez, y este problema aún se mantuvo hasta el año 2010, cuando el IMTA detectó 10 sitios de descarga (Espinosa *et al*, 2010) durante la elaboración del “*Plan para la recuperación ambiental de la laguna de Bojórquez, Cancún, Q.R.*”, además que parte de la red de alcantarillado de la periferia de la laguna de Bojórquez se encontraba en mal estado, lo que representa una fuente de contaminación difusa sobre la laguna.

Para mejorar las condiciones ambientales de la laguna de Bojórquez, el Gobierno del estado de Quintana Roo gestionó recursos federales para llevar a cabo el proyecto denominado “Restauración ecológica de la laguna de Bojórquez”. En este se contempla la construcción de una herramienta de soporte para la generación de escenarios de restauración ecológica. Dicha herramienta consiste en la implementación de un modelo hidrodinámico para la caracterización del sistema lagunar en condiciones actuales y de proyecto, con las últimas se pretende dar solución a los problemas que actualmente enfrenta la laguna.

En los siguientes incisos se muestran las bases de datos utilizadas, datos adquiridos mediante mediciones sistemáticas, y las simulaciones numéricas del sistema lagunar en condiciones actuales y de proyecto.

5.2.2 Base de datos

5.2.2.1 Mareas

Para la modelación hidrodinámica se consideraron siete componentes armónicas de la marea (Tabla 2.1). Los valores de amplitud y fase de cada componente a lo largo de la frontera del dominio de cálculo, se obtuvieron de la base de datos de marea TPXO7.1 obtenida mediante OTIS (Egbert *et al.* (2002)). Donde T es el periodo; C es la amplitud potencial de equilibrio newtoniano; y α el factor de reducción en el campo de gravedad debido a la tierra.

Componente		T (h)	C (m)	α
K1	Luni solar	23.934470	0.141565	0.736
O1	Lunar principal	25.819342	0.100514	0.695
Q1	Elíptico lunar	26.868357	0.019256	0.695
M2	Lunar principal	12.420601	0.242334	0.693
S2	Solar principal	12.000000	0.112841	0.693
N2	Elíptico lunar	12.658348	0.046398	0.693
K2	Luni solar	11.967235	0.030704	0.693

Tabla 2.1 Componentes armónicas utilizadas en la simulación (Spargo *et al.*, 2004).

5.2.2.2 Batimetría

Para implementar el modelo de circulación del sistema lagunar de Nichupté, se usaron tres bases de datos batimétricas. La primera fue GEBCO (*General bathymetric chart of the oceans*), que cubre todo el globo terrestre con una resolución de 30 segundos de grado en latitud y longitud. De esta base de datos se extrajo un dominio que incluye costas tanto de Quintana Roo como de Yucatán (Figura 5.2.1). La segunda base de datos utilizada fue el portulano número S.M.922.1 de la Secretaría de Marina (2001), de la cual se obtuvo la batimetría de Cancún, Isla Mujeres y proximidades (Figura 5.2.2). Finalmente, se hizo uso de una batimetría del sistema lagunar obtenida por el IMTA en el año 2000 (Figura 5.2.3).

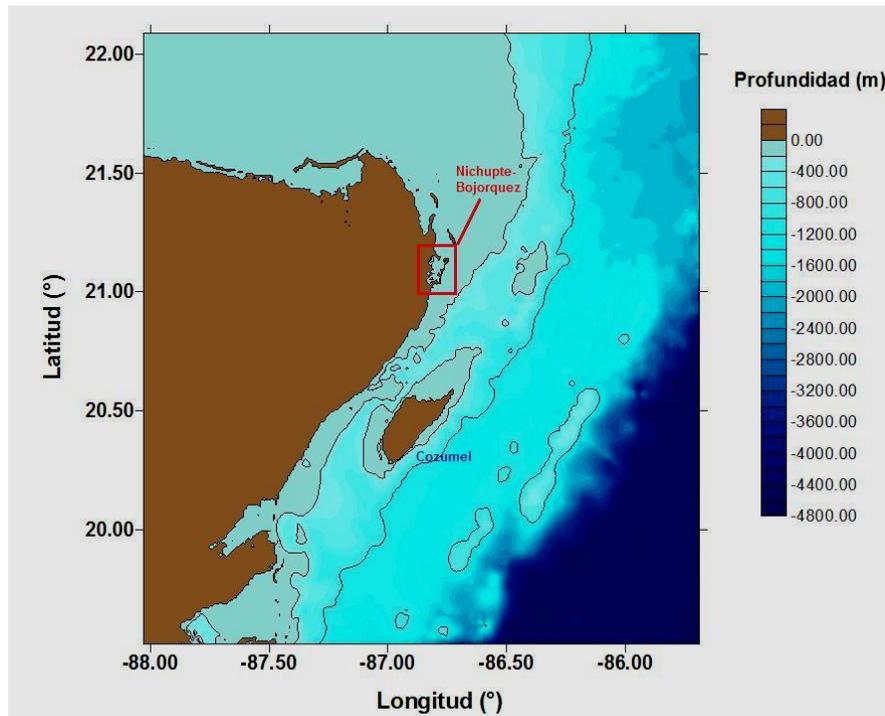


Figura 5.2.1 Batimetría para Quintana Roo y Parte de Yucatán. Modificado de GEBCO (2009)

La batimetría realizada por el IMTA en el año 2001 (Figura 5.2.3), fue modificada en los canales Sigfrido y Nizúc, así como también en algunas zonas de la laguna de Bojórquez, con datos obtenidos de las perfilaciones acústicas durante la medición de velocidades en los canales, y mediante los datos de una batimetría reciente de la laguna de Bojórquez realizada por el IMTA en el 2010 (Espinosa *et al*, 2010).

Con la extensión de dominio propuesta, fue posible representar adecuadamente la propagación de la onda de marea en la zona de estudio, tomando como forzantes la base de datos OTIS (Egbert *et al.*, 2002).

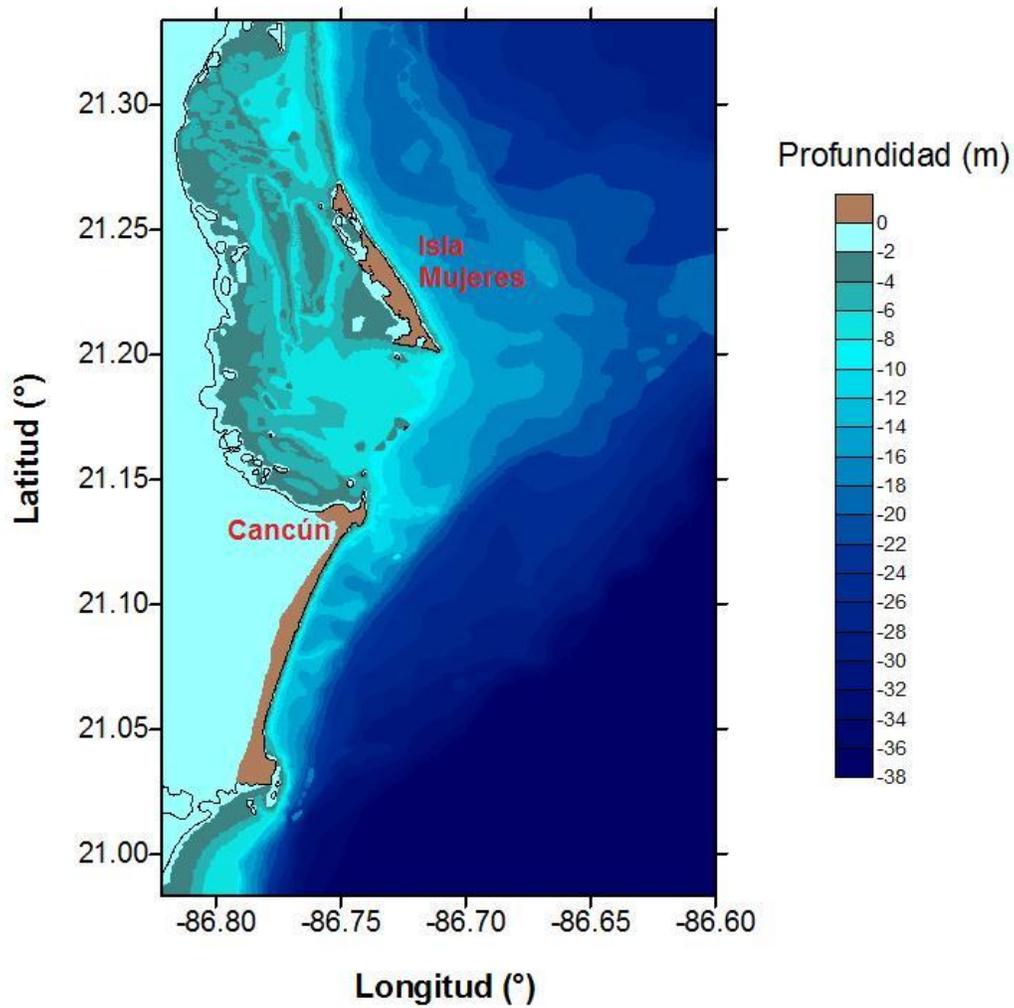


Figura 5.2.2 Batimetría cercana a Cancún, Quintana Roo. Modificado de SEMAR (2001)

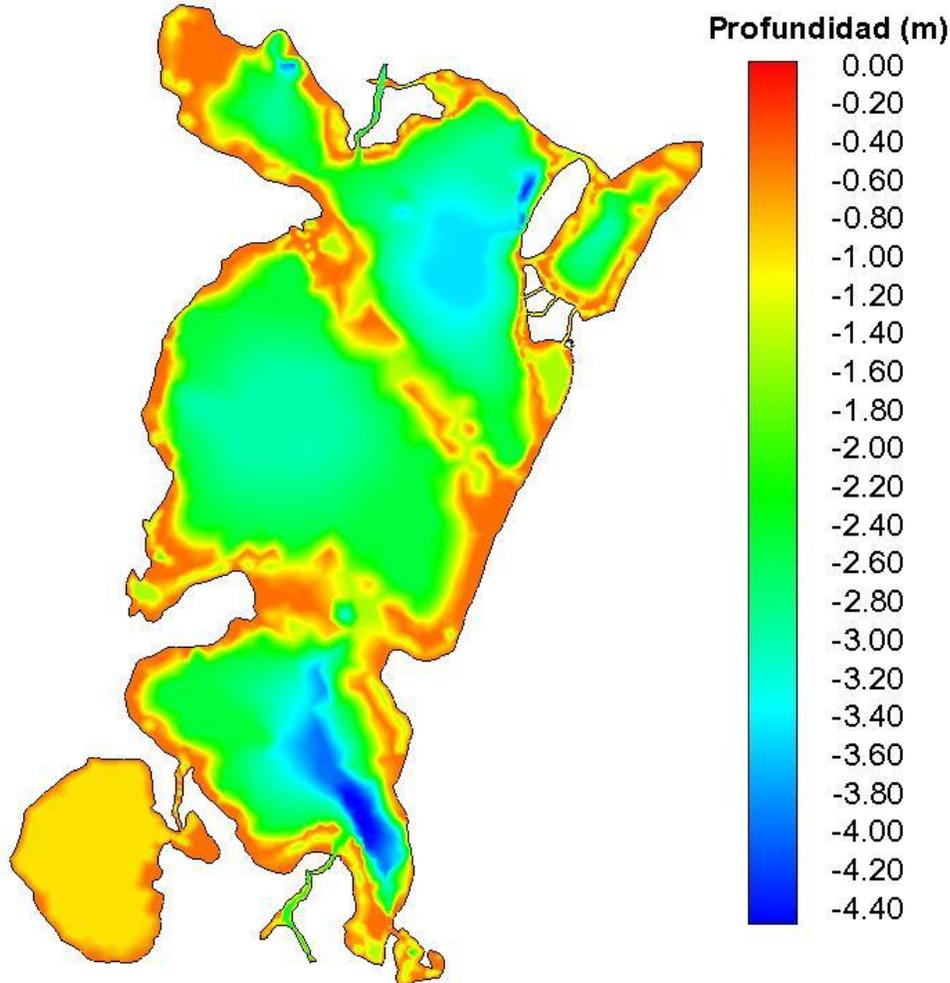


Figura 5.2.3 Batimetría del sistema lagunar Bojórquez-Nichupté. Modificado de IMTA(2001)

5.2.3 Mediciones de parámetros físicos en el sistema lagunar

Como parte de los estudios de la laguna de Bojórquez, a finales de septiembre y diciembre de 2011 se llevaron a cabo series de mediciones sistemáticas con el fin de conocer parámetros físicos del sistema lagunar, como son velocidades, temperatura y salinidad.

Para la medición de corrientes en la entrada norte de la laguna de Bojórquez, el 21 de diciembre de 2011 se ancló un perfilador doppler marca Sontek modelo IQ tal como se muestra en la Figura 5.2.4.

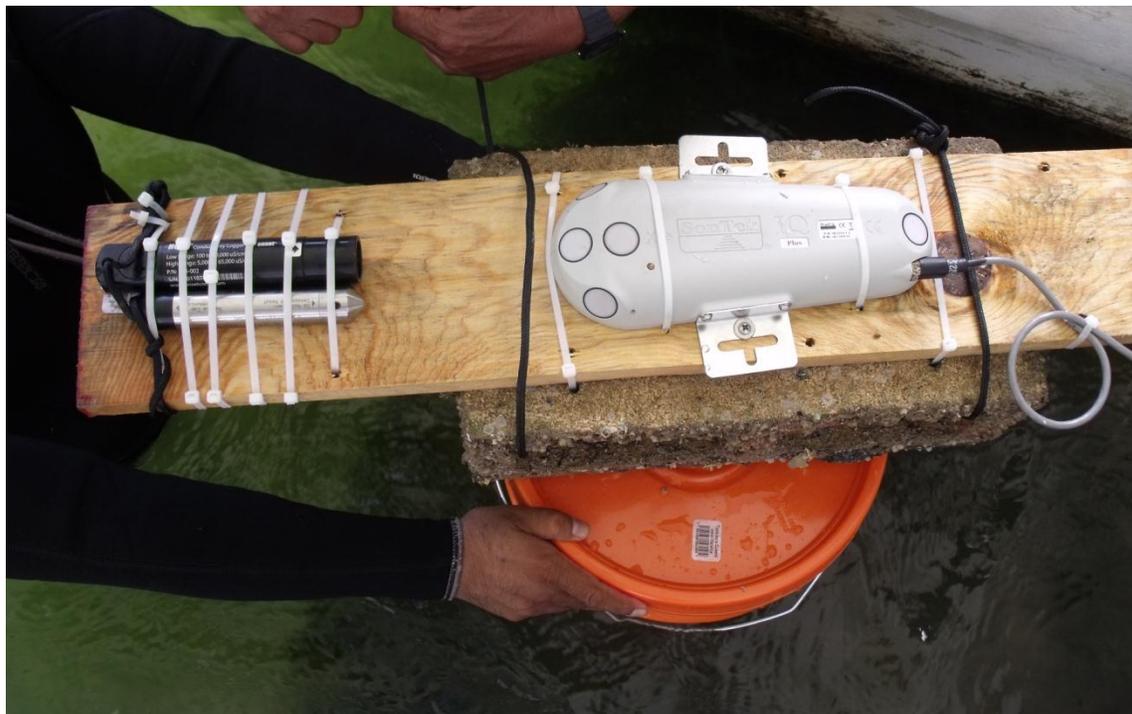


Figura 5.2.4 Perfilador doppler con baterías listo para ser anclado en el canal norte de entrada a la laguna de Bojórquez

El perfilador IQ se montó en una base de madera y se ancló en la parte central del canal norte de Bojórquez. El suministro de energía al perfilador se proveyó a través de un cable conectado a una batería de 12 volts que se ubicó en un costado del canal. El IQ (3 MHz) tiene un rango de medición de 0.08 a 5.0 m y puede medir hasta 10 celdas en un rango de 2 a 10 cm. Cuenta con dos transductores midiendo longitudinalmente en dirección del flujo y 2 en forma lateral. Cuenta con un sensor de temperatura, presión y un haz acústico vertical. Estos últimos para medir el nivel del agua.

El perfilador doppler IQ está diseñado para medir en canales de riego y es uno de los últimos desarrollos en tecnología doppler para la medición de flujo en canales. Sin embargo, se consideró que se podría aprovechar esta tecnología y ver su capacidad de medición en canales de marea.

Para las mediciones en el canal sur se instaló el 21 de diciembre de 2011 un perfilador doppler lateral de la marca Sontek, modelo SL de 3 MHz. El perfilador Sontek SL se instaló en la entrada sur de la laguna de Bojórquez. Con este perfilador se monitoreó la velocidad y el nivel del mar. En la Figura 5.2.5 se muestran los trabajos de montaje del Perfilador. Este se instaló sobre un pilote vertical ubicado en la entrada sur del canal de entrada a la laguna.



Figura 5.2.5 Perfilador doppler lateral SL de 3 MHz instalado en la entrada del canal sur de la laguna de Bojórquez en Cancún, QR

Para establecer el campo de masa en la laguna de Nichupté y Bojórquez se llevaron a cabo mediciones de temperatura, conductividad y profundidad. Para esto se utilizó un CTD CastAway de la marca YSI. En Figura 5.2.6 se presenta el CTD CastAway que fue utilizado para las mediciones. Los lances de CTD se llevaron a cabo del 21 de diciembre de 2011.



Figura 5.2.6 CTD CastAway utilizado para las mediciones en la laguna de Nichupte y Bojórquez en Cancún, Q.R

La red de lances que se llevo a cabo en la laguna de Nichupte y Bojórquez se presenta en forma esquemática en la Figura 5.2.7.



Figura 5.2.7 Mapa esquemático de los lanzes de CTD en la laguna de Nichupté y Bojórquez en Cancún, QR.

5.2.3.1 Resultados de temperatura y salinidad

Se presentan el total los perfiles medidos de temperatura (Figura 5.2.11) y salinidad (Figura 5.2.12) medidos en la laguna de Nichupté y Bojórquez. Se observa una estructura homogénea en la vertical y una variación espacial en la temperatura. La laguna presenta una temperatura de entre 24.7 y 26.2 °C. La salinidad presenta un comportamiento similar a la temperatura con una estructura

vertical casi homogénea por lo que las variaciones observadas corresponden a la ubicación de las estaciones. El rango observado de salinidad corresponde de 17 a 35 ups. Los valores mínimos corresponde a la parte oeste de la laguna de Nichupté y los máximos a la entrada sur de la laguna de Nichupté.

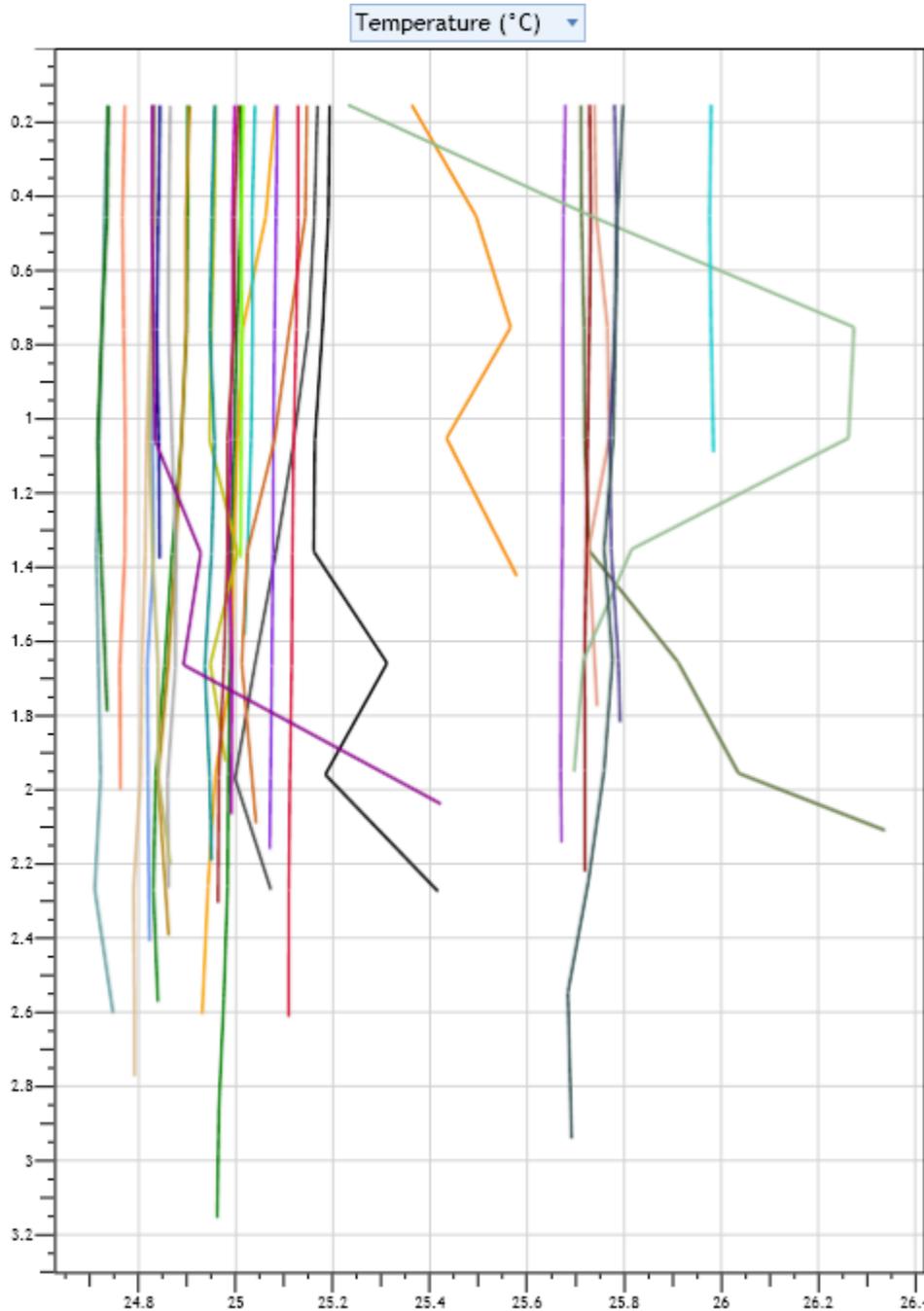


Figura 5.2.8 Perfiles de temperatura medidos por el CTD en la laguna de Nichupte y Bojórquez en Cancún, QR.

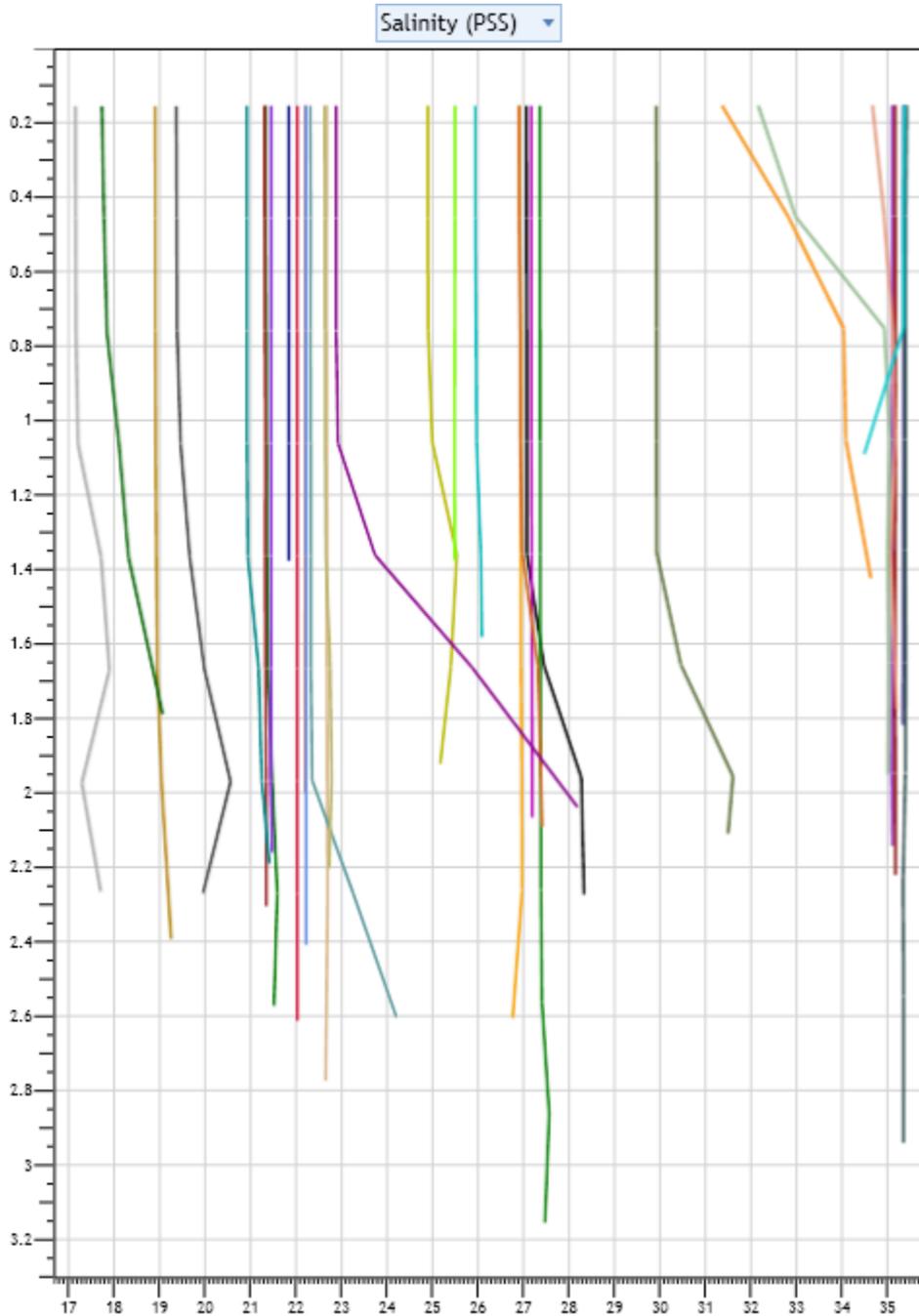


Figura 5.2.9 Perfiles de salinidad medidos por el CTD en la laguna de Nichupte y Bojórquez en Cancún, QR.

En la Figura 5.2.10 se presentan la ubicación de los lances llevados a cabo en la laguna de Bojórquez. Específicamente se muestreo en la boca norte, sur y una estación intermedia para establecer la estructura de la columna de agua. En la

Figura 5.2.11 se presenta los perfiles de temperatura que verticalmente son homogéneos, sin embargo, espacialmente presentan un gradiente horizontal. La mayor temperatura se presenta en el canal norte siendo esta de 25.9°C disminuyendo a 25.2°C en el canal sur. La salinidad en la laguna de Bojórquez es prácticamente homogénea en la vertical y fue de 27 ups. En el canal sur en la superficie fue prácticamente de 27 ups sin embargo hacia el fondo mostro un incremento en la salinidad llegando a 28.3 en el fondo.

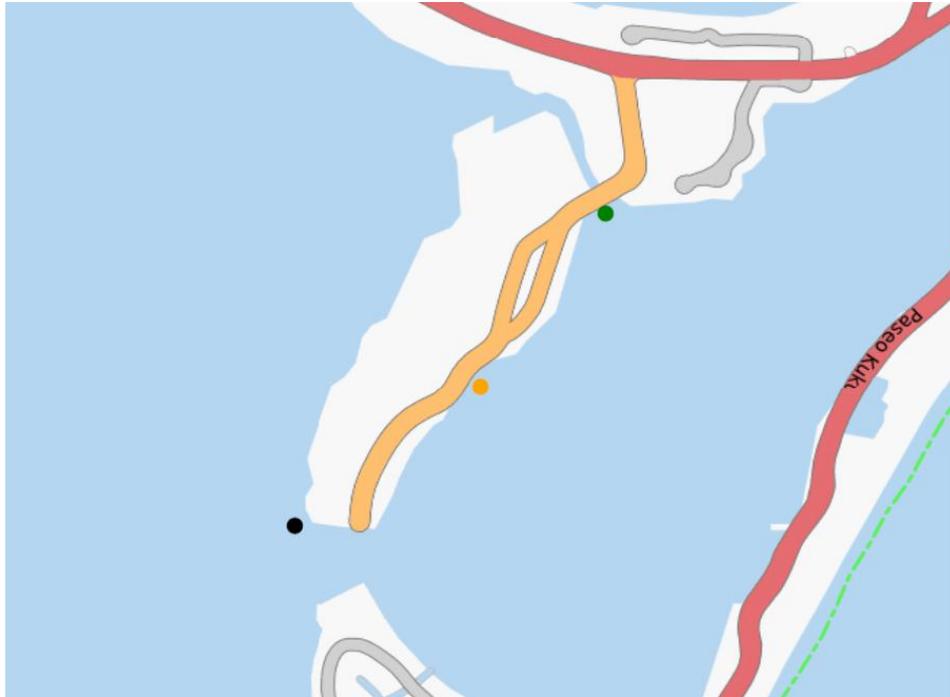


Figura 5.2.10 Mapa esquemático de los lances de CTD en la laguna de Bojórquez el 21 de diciembre de 2011.

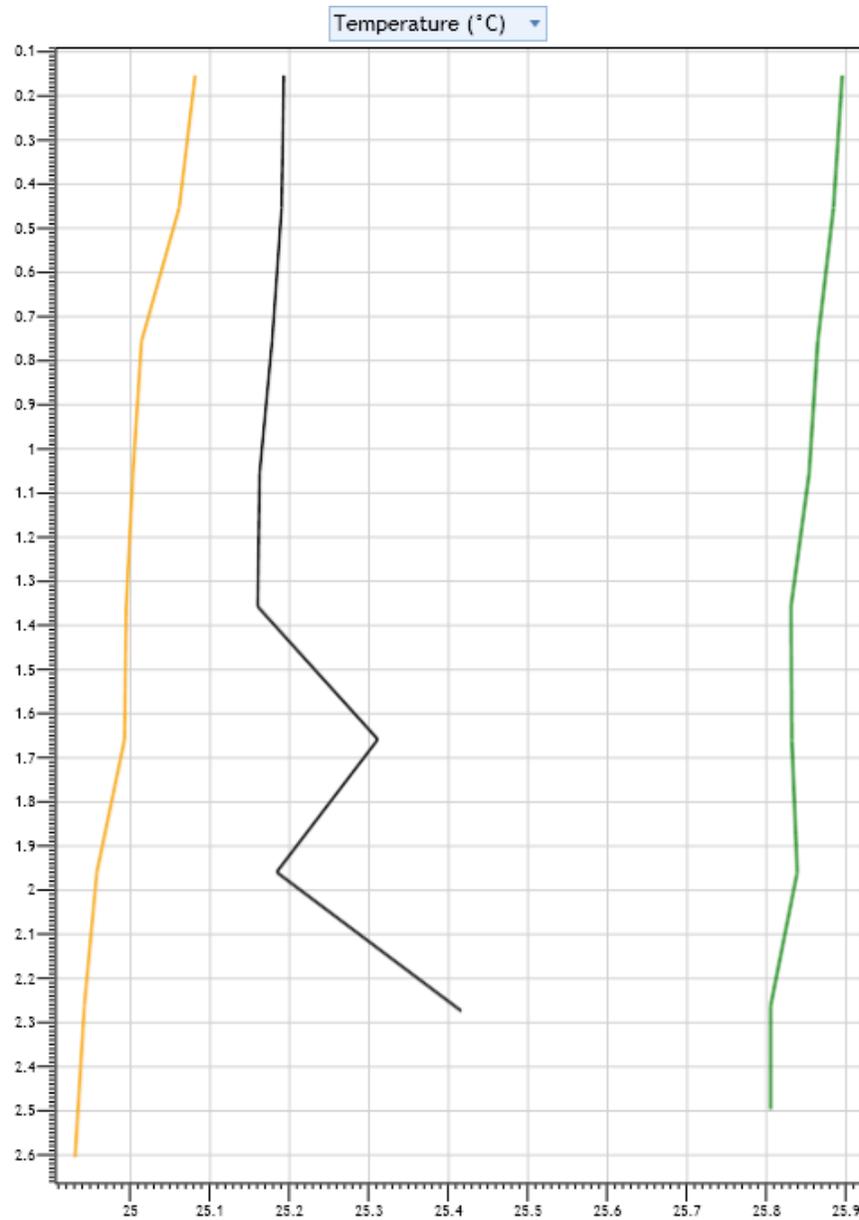


Figura 5.2.11 Perfiles de temperatura medidos por el CTD en la laguna de Bojórquez el 21 de diciembre de 2011.

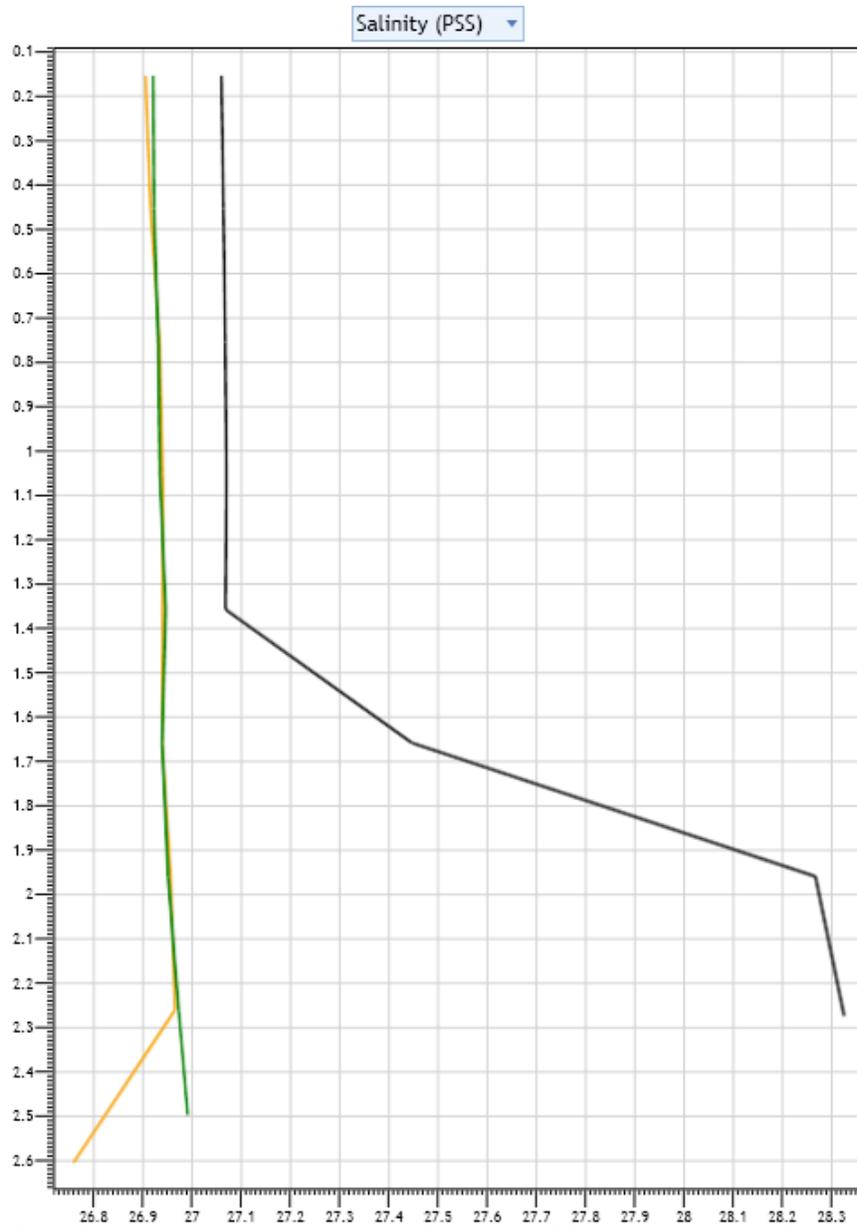


Figura 5.2.12 Perfiles de salinidad (ups) medidos por el CTD en la laguna de Bojórquez el 21 de diciembre de 2011.

5.2.3.2 Variación temporal del nivel de la superficie libre del agua, temperatura y salinidad

Para monitorear el nivel del mar y la salinidad en la entrada a la laguna de Bojórquez se instalaron 3 sensores de presión y 2 sensores de conductividad. En las bocas norte y sur se midió nivel, temperatura y salinidad. Asimismo en la parte central de la laguna de Nichupté se instaló un sensor de presión. En la Figura 5.2.13 a la Figura 5.2.15 se muestran las series de tiempo de las mediciones para el sensor de presión en el centro de Nichupté, y boca sur y norte de Bojórquez. En la Figura 5.2.13 de la serie de temperatura y nivel de la laguna medidos en la parte central de la laguna de Nichupté, se observa que la temperatura tiende a incrementarse de 23 a 25°C con una variación diaria muy marcada a lo largo del periodo. La marea presenta variaciones semanales que pueden ser atribuidos a cambios meteorológicos y las respectivas variaciones diurnas y semidiurnas con un rango de aproximadamente 10 cm entre la pleamar y bajamar.

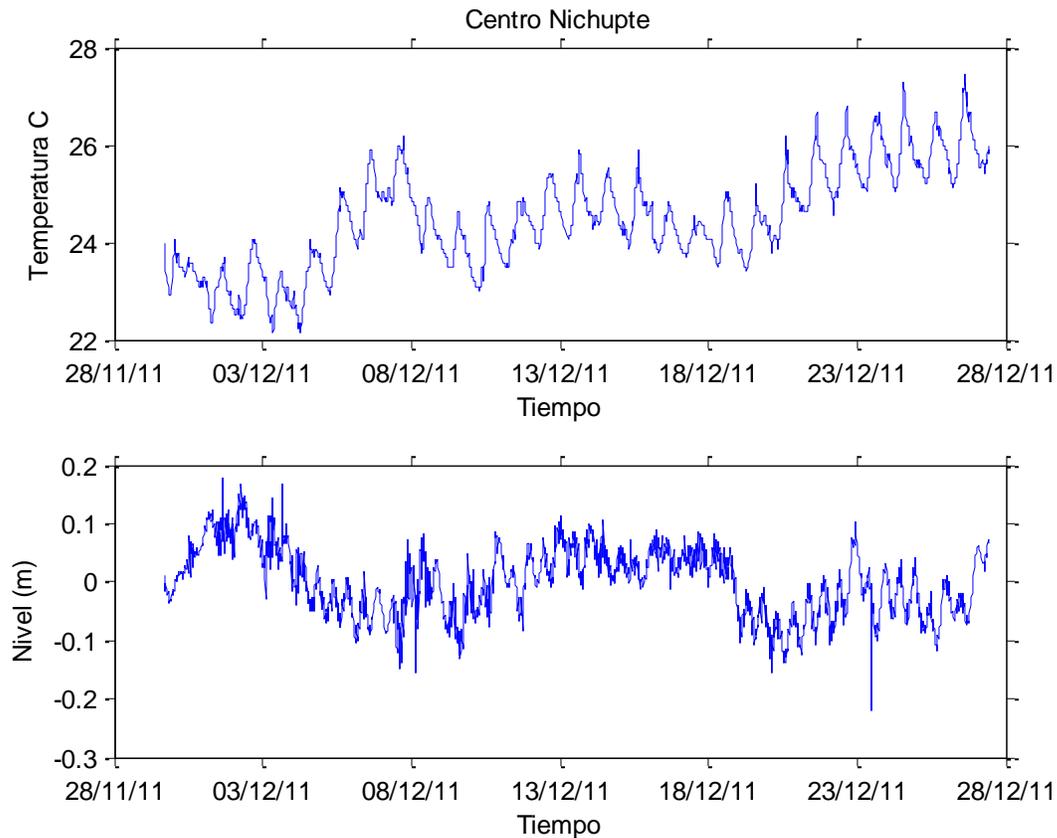


Figura 5.2.13 Serie de tiempo de los datos de temperatura y nivel de la laguna en la parte central de la laguna de Nichupté.

En la Figura 5.2.14 se presenta la serie de temperatura, nivel de la laguna y salinidad en la boca sur de Bojórquez. Desde finales de septiembre de 2011 se ancló un sensor de presión hasta el 27 de diciembre de 2011. El periodo del sensor de conductividad fue del 29 de noviembre al 27 de diciembre de 2011. A lo largo del periodo se observa un decremento en la tendencia de la temperatura de 31 a 25°C. Asimismo, se observan variaciones diurnas en la temperatura a lo largo de todo el periodo. A lo largo del periodo se observan una serie de variaciones en la marea debido a efectos meteorológicos y las correspondientes variaciones diurnas y semidiurnas. El rango máximo de la marea fue de aproximadamente 10 cm. La salinidad durante el periodo oscilo entre los 19 y 25 ups.

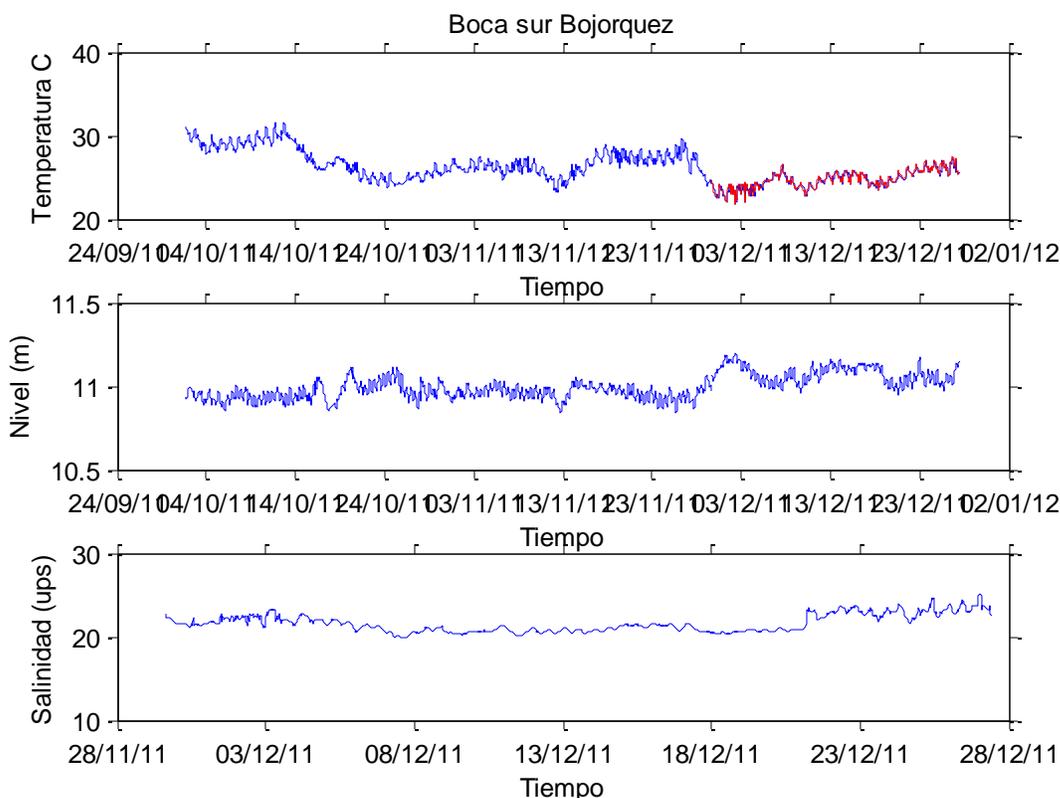


Figura 5.2.14 Serie de tiempo de los datos de temperatura nivel y salinidad en la boca sur de la laguna de Bojórquez.

En la Figura 5.2.15 se presenta la serie de temperatura, nivel de la laguna y salinidad en la boca norte de Bojórquez. Similarmente, desde finales de septiembre de 2011 se ancló un sensor de presión hasta el 27 de diciembre de 2011. El periodo del sensor de conductividad fue del 29 de noviembre al 27 de diciembre de 2011. El decremento en la temperatura es similar al de la boca sur. A lo largo del periodo se observa un decremento en la tendencia de la temperatura

de 31 a 23°C. Asimismo, se observan variaciones diurnas en la temperatura a lo largo de todo el periodo. Aunque el sensor de marea estuvo funcionando todo el tiempo los datos son inconsistentes. La salinidad se incremento gradualmente con variaciones posiblemente inducidas por la marea.

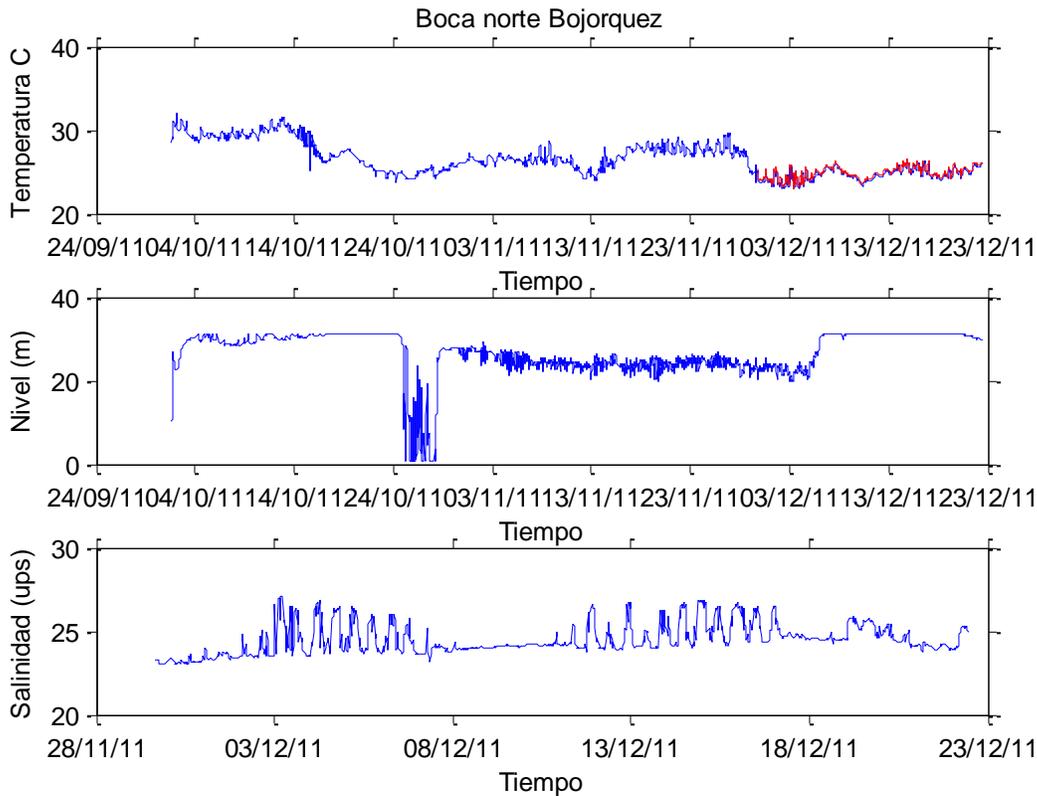


Figura 5.2.15 Serie de tiempo de los datos de temperatura nivel y salinidad en la boca sur de la laguna de Bojórquez.

5.2.3.3 Corrientes en la boca de la isla Pok-ta-pok

El medidor instalado en la boca norte fue vandalizado por lo que tuvo que ser retirado al siguiente día de su instalación por lo tanto no se cuenta con datos para es canal. Sin embargo el medidor instalado en la parte sur estuvo funcionando de forma normal. En la Figura 5.2.16 se presenta las series de nivel, velocidad y temperatura del sitio. Las velocidades máximas fueron de aproximadamente 15 a 20 cm/s. Se observa que las mayores velocidades son durante el refluo cuando

Bojórquez se está vaciando. La temperatura para este periodo vario entre 25 a 27°C.

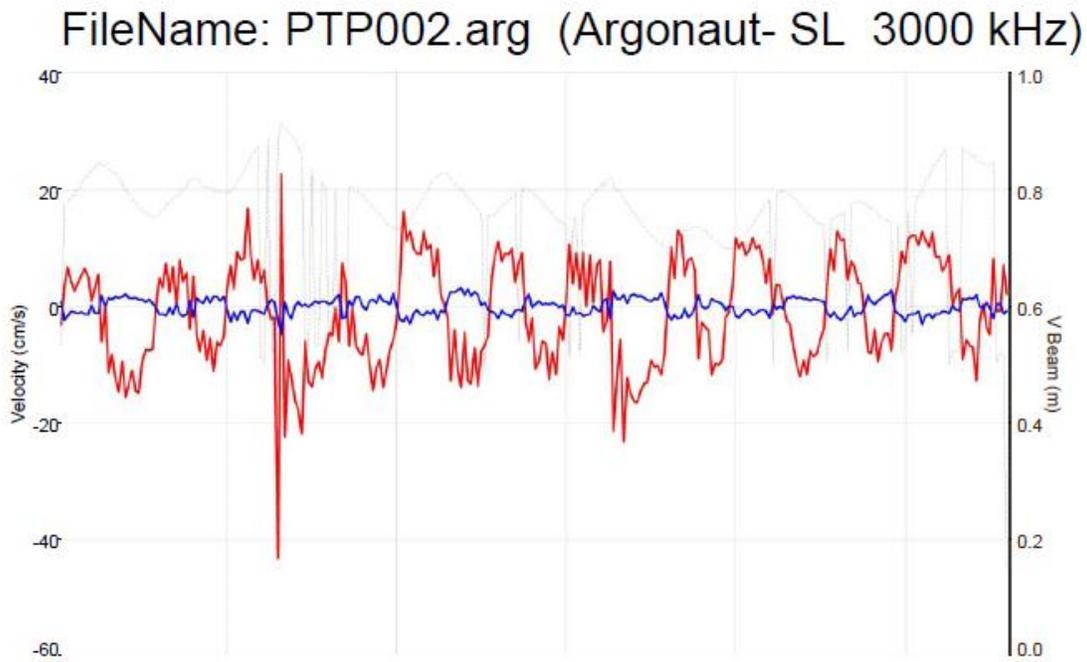


Figura 5.2.16 Variación de velocidades en la boca sur.

5.2.4 Modelación numérica de la hidrodinámica

Para la modelación de la hidrodinámica del sistema laguna Nichupté-Bojórquez en sus condiciones actuales, y de las alternativas de proyecto para la disminución de los tiempos de residencia, se hizo uso del modelo numérico ADCIRC-2DDI.

El ADCIRC-2DDI es un modelo hidrodinámico promediado en la vertical, en el que se resuelven las ecuaciones de aguas someras mediante el método de elemento finito. A diferencia de muchos modelos de este tipo, en ADCIRC-2DDI no se resuelve la ecuación de continuidad en su forma primitiva, sino la ecuación de continuidad generalizada de onda (GWCE):

$$\begin{aligned} & \left. \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ U \frac{\partial \zeta}{\partial t} - UH \frac{\partial U}{\partial x} - VH \frac{\partial U}{\partial x} + fVH - H \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] - E_{h2} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x \partial t} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - (\tau_* - \tau_0)UH \right\} \right. \\ & \left. + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ V \frac{\partial \zeta}{\partial t} - UH \frac{\partial V}{\partial x} - VH \frac{\partial V}{\partial y} - fUH - H \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] - E_{h2} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial y \partial t} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - (\tau_* - \tau_0)VH \right\} = 0 \right. \end{aligned}$$

La ecuación anterior se resuelve en forma conjunta con las ecuaciones de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial u}{\partial y} - fv = - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] + \frac{1}{H} M_x + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \tau_* U$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \alpha\eta) \right] + \frac{1}{H} M_y + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \tau_* V$$

$$M_x = E_{h2} \left[\frac{\partial^2 UH}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 UH}{\partial y^2} \right]$$

$$M_y = E_{h2} \left[\frac{\partial^2 VH}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 VH}{\partial y^2} \right]$$

donde ζ , es la elevación de la superficie libre; U, V , las velocidades integradas en la vertical en direcciones x e y , respectivamente; H , la profundidad total $H = h + \zeta$; h , la profundidad relativa; f , el parámetro de coriolis, $f = 2\Omega \sin \phi$; Ω , la velocidad angular de la tierra; ϕ , la latitud; P_s , la presión atmosférica en la superficie libre; ρ_0 , la densidad del agua; g , la aceleración de la gravedad; P_s , la presión atmosférica en la superficie; η , el factor de equilibrio; α , el factor de elasticidad de la tierra; τ_{sx} y τ_{sy} el esfuerzo cortante en la superficie libre del

agua en las direcciones x e y ; τ_* , el esfuerzo cortante en el fondo, $\tau_* = C_f (U^2 + V^2)^{1/2} / H$; C_f , el coeficiente de fricción del fondo, y M_x, M_y los coeficientes de difusión en x e y respectivamente y E_{h2} es el coeficiente de difusión turbulenta.

5.2.5 Hidrodinámica en condiciones actuales

Para la simulación de las condiciones actuales, se utilizó una malla triangular no estructurada con 45185 nodos y 83275 elementos (Figura 5.2.17 a Figura 5.2.19). La extensión del dominio de cálculo abarca desde 61 km hacia el noroeste sobre la línea de costa a partir de la boca del canal Sigfrido, hasta 154 km hacia el suroeste (sobre la línea de costa) a partir de la boca del canal Nizúc, con un ancho de 70 km medidos desde la línea de costa hacia mar adentro. El tamaño medio de los elementos en la región mar adentro fue de 3.77 km, dentro de la laguna de Nichupté de 55 m, y dentro de la laguna de Bojórquez de 31 m. Las simulaciones se realizaron en dos fases, la primera corresponde al periodo de tiempo en el cual se realizó la primera campaña de mediciones, para la cual se hizo una simulación de 15 días continuos. La Figura 5.2.20 muestra la señal de marea obtenida mediante la simulación numérica en las bocas de los canales Sigfrido y Nizúc del 22 de Septiembre al 1ro de Octubre de 2011. Esta primera fase sirvió para la validación de las simulaciones. La segunda, corresponde a todo el mes de diciembre más los dos últimos dos días de noviembre, que en total abarca un periodo de 33 días simulados. Para este periodo, se calculó el tiempo de residencia de la laguna de Bojórquez.

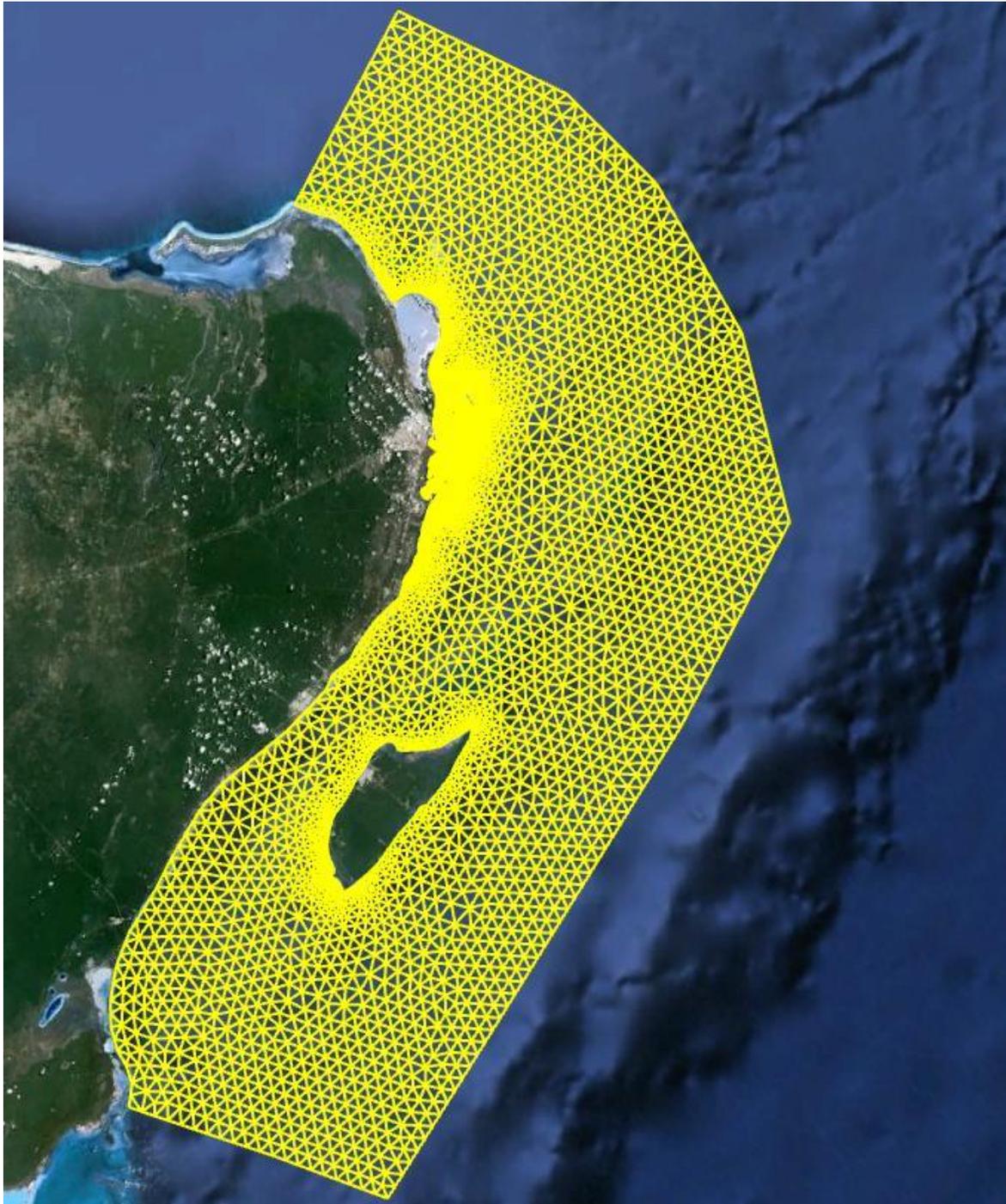


Figura 5.2.17 Vista global de la discretización de dominio de cálculo. Modificado de Google Earth.

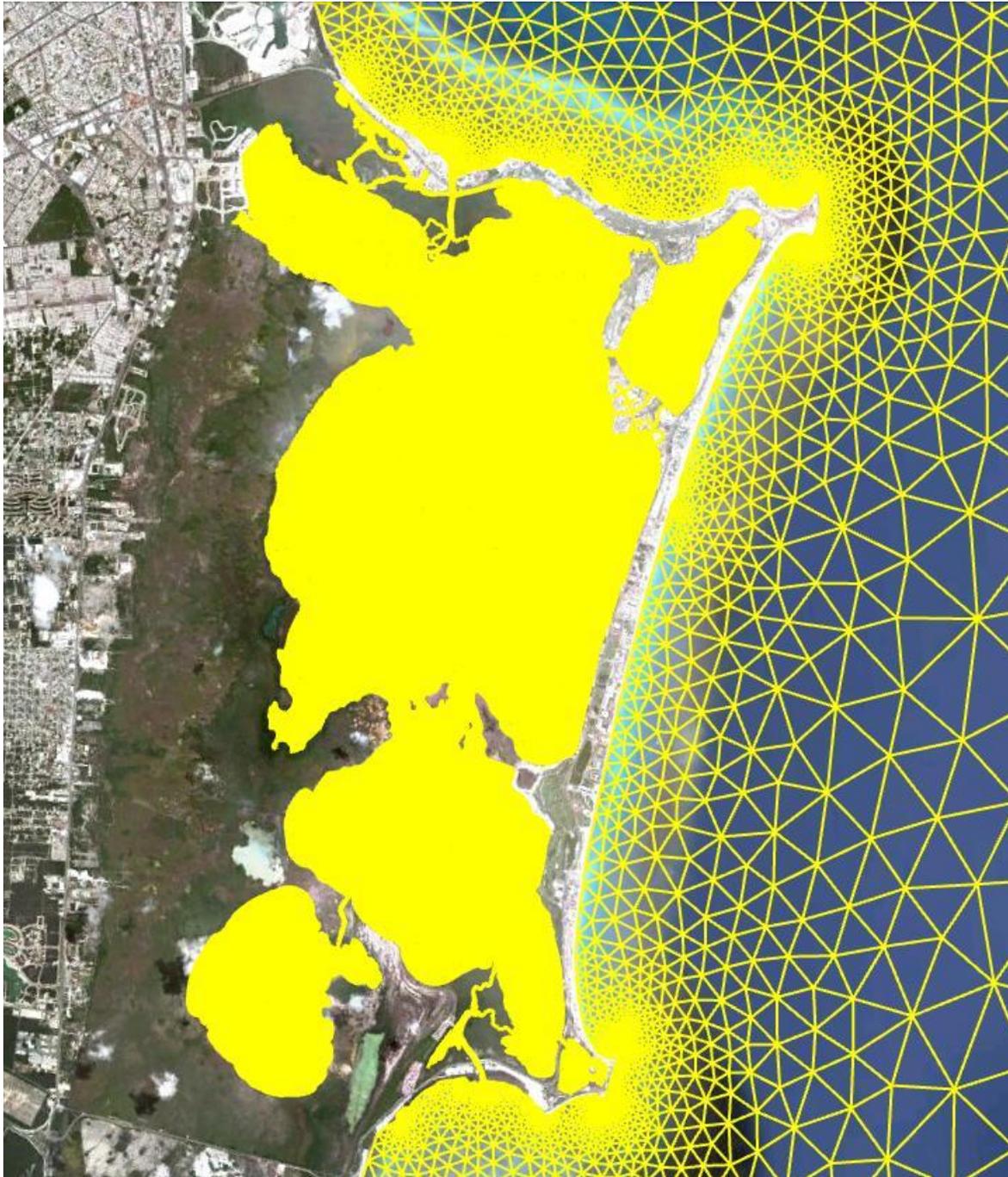


Figura 5.2.18 Malla sobre el sistema lagunar Nichupté-Bojórquez.

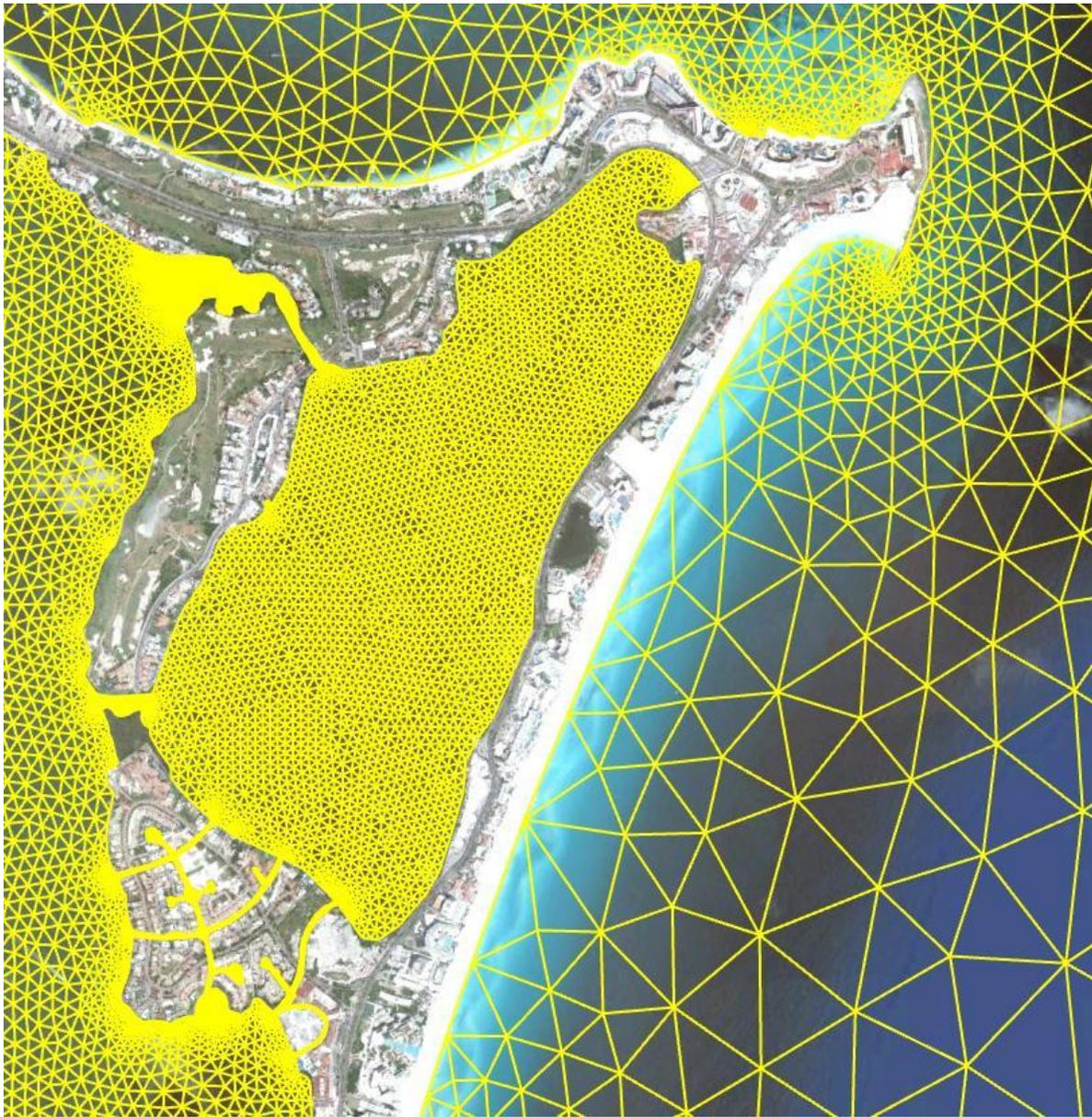


Figura 5.2.19 Detalle de la malla en la Laguna de Bojórquez.

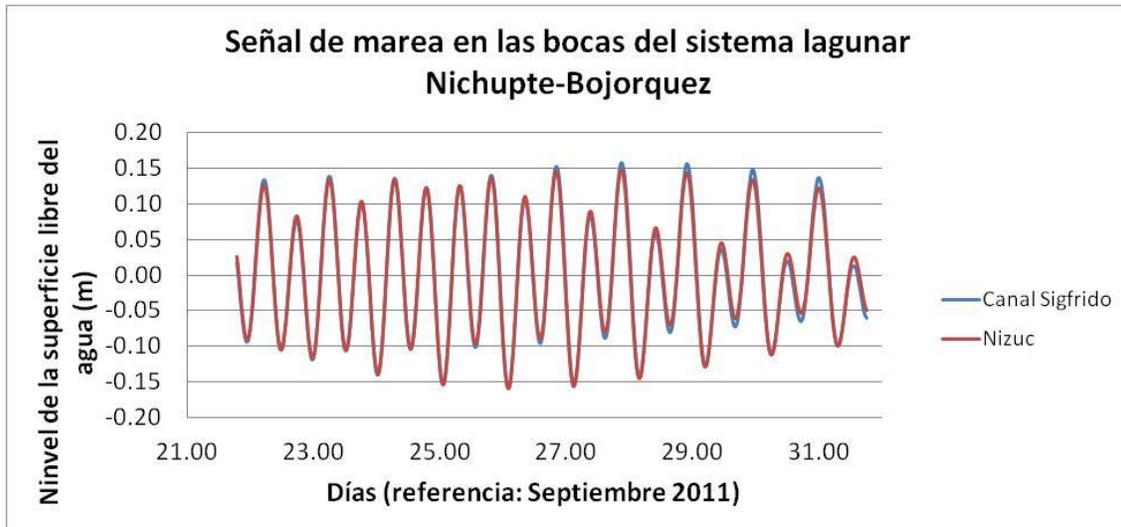


Figura 5.2.20 Señal de marea simulada en las bocas de los canales Sigfrido y Nizúc (tiempo GMT-6:00).

Para validar las simulaciones, se hizo una comparación entre los niveles de la superficie libre medidos y simulados en los diferentes puntos del sistema lagunar, esto es, dentro del canal Sigfrido (Figura 5.2.21), en el canal Pok-ta-pok norte (Figura 5.2.22), y en el canal Nizúc (Figura 5.2.23). Puede observarse que tanto las amplitudes y fases lograron reproducirse numéricamente con una aproximación razonable.

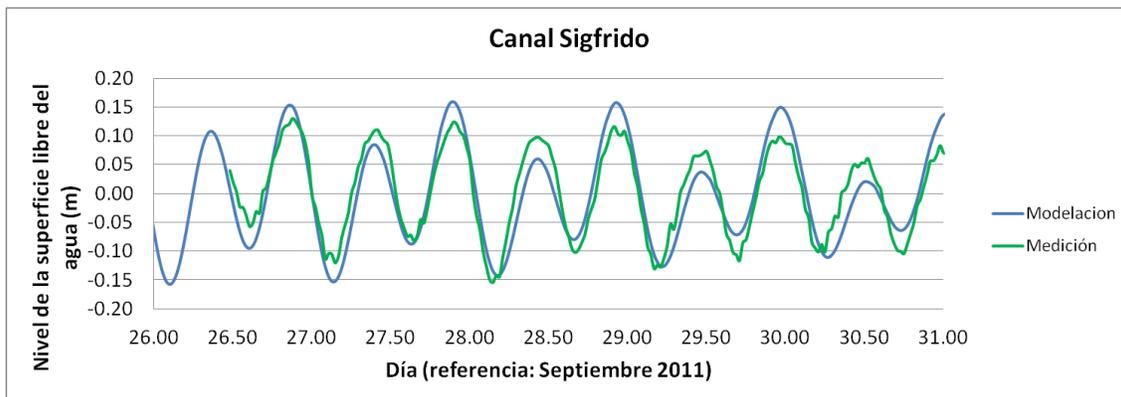


Figura 5.2.21 Comparación del nivel de la superficie libre del agua medido y simulado en el Canal Sigfrido. (tiempo GMT-6:00).

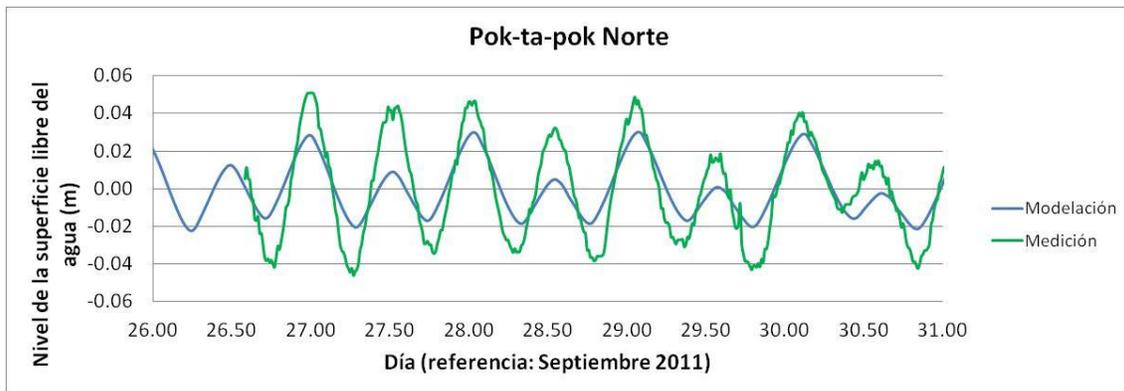


Figura 5.2.22 Comparación del nivel de la superficie libre del agua medido y simulado en el canal Pok-ta-pok norte (tiempo GMT-6:00).

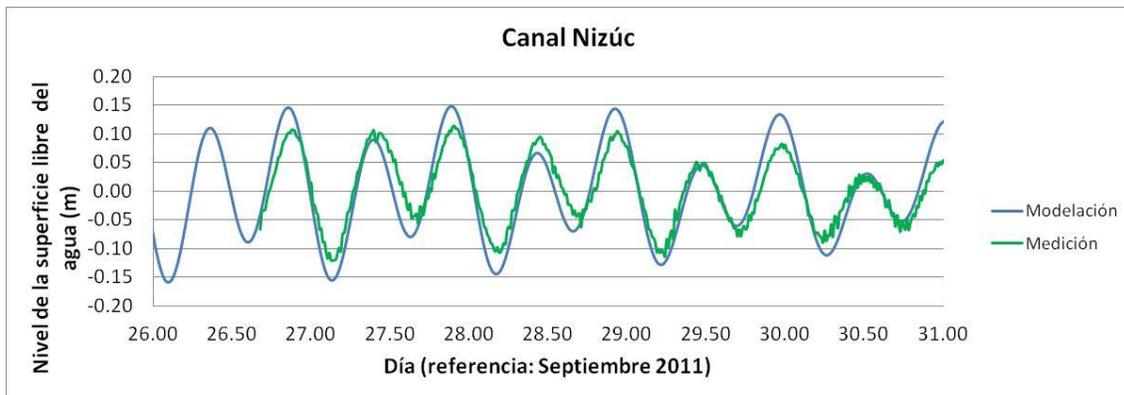


Figura 5.2.23 Comparación del nivel de la superficie libre del agua medido y simulado en el Canal Nizúc (tiempo GMT-6:00).

Una vez validadas las simulaciones, así como también la base de datos utilizada para el forzamiento del modelo, se simuló la hidrodinámica del sistema lagunar para el mes de diciembre de 2011. A continuación se describen los resultados de la hidrodinámica para las condiciones de mareas muertas y mareas vivas durante dicho mes.

5.2.5.1 Mareas muertas

De la Figura 5.2.24 a la Figura 5.2.27 se muestran las condiciones hidrodinámicas para el periodo de mareas muertas escogido, el cual fue del 1ro al 6 de diciembre de 2011. Las figuras escogidas representan las velocidades máximas que llegan a desarrollarse en la laguna de Bojórquez. Como era de esperarse, las velocidades máximas se presentan en los canales de comunicación entre las lagunas de Nichupté y Bojórquez, que llegan a alcanzar valores de 2.5 cm/s durante el ascenso de la marea, y de hasta 3.5 cm/s durante el descenso. Aunque no existe

diferencia significativa entre el entre los niveles de la superficie libre en toda la laguna de Bojórquez, las velocidades son sumamente pequeñas. Sobre todo en la parte norte de la misma, que ha sido como una zona estanca y que durante la época de estiaje, se perciben olores muy desagradables. En el caso de los canales de isla dorada, incluso durante el descenso de la marea, las velocidades nunca llegan a los 2 cm/s.

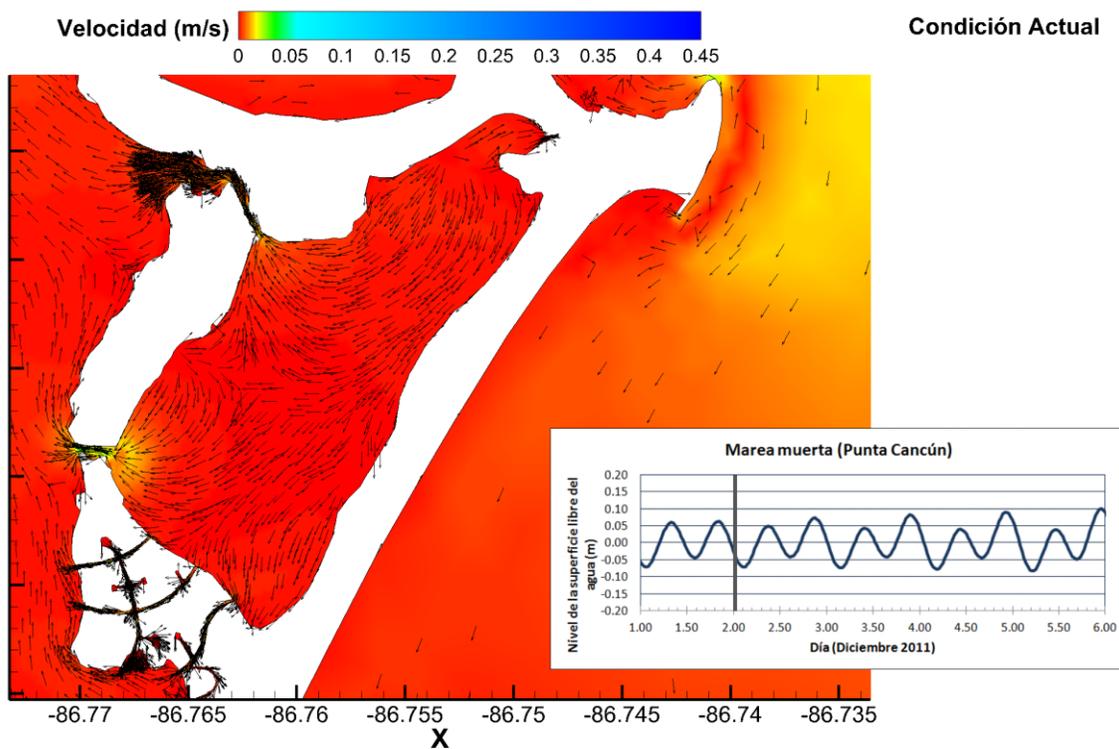


Figura 5.2.24 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 02/Dic/2011 00:00 hr (tiempo GMT).

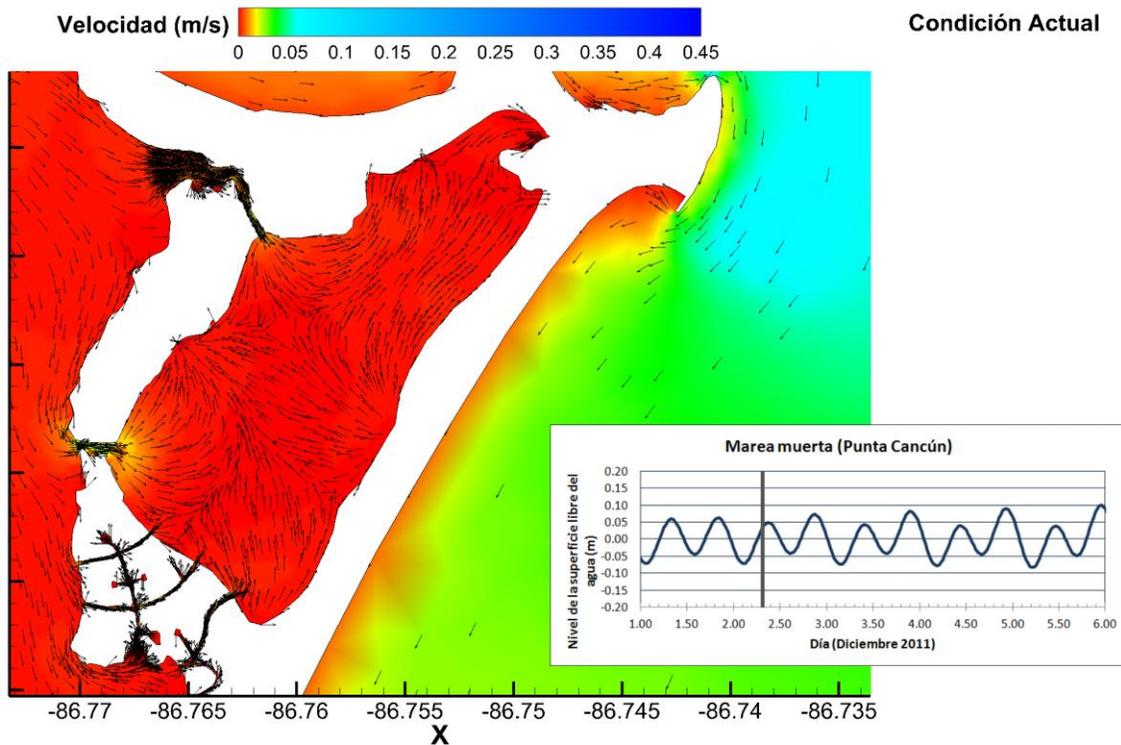


Figura 5.2.25 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 02/Dic/2011 07:00 hr (tiempo GMT).

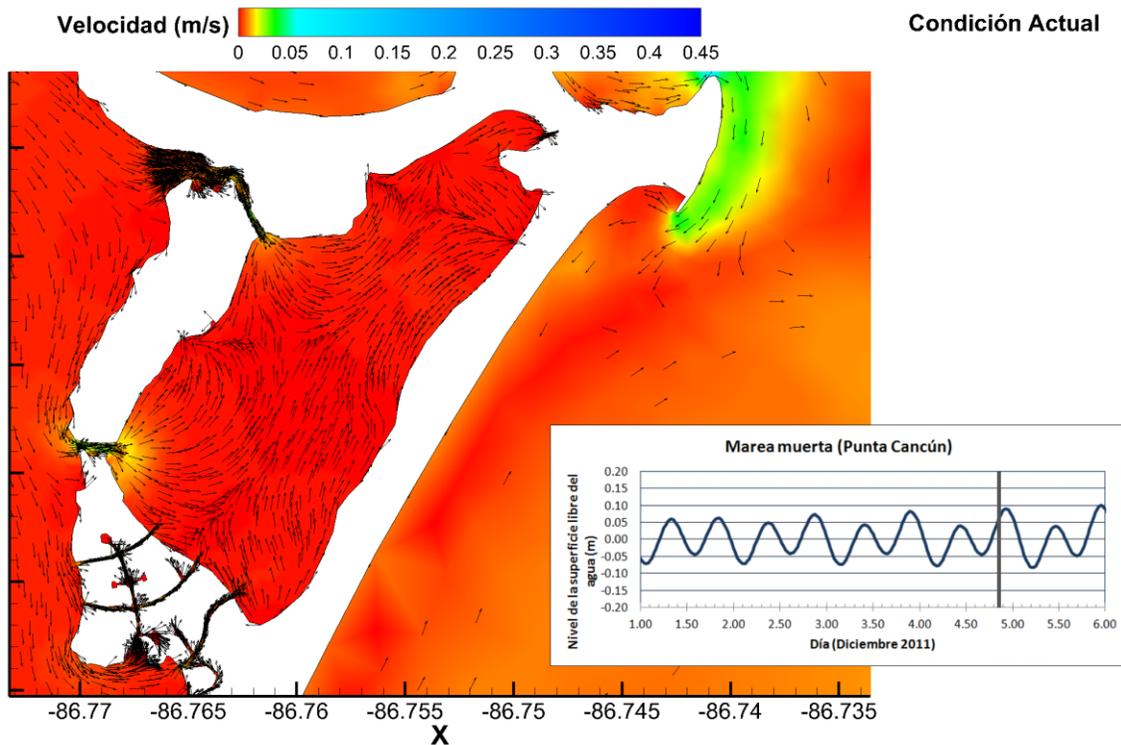


Figura 5.2.26 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 04/Dic/2011 20:00 hr (tiempo GMT).

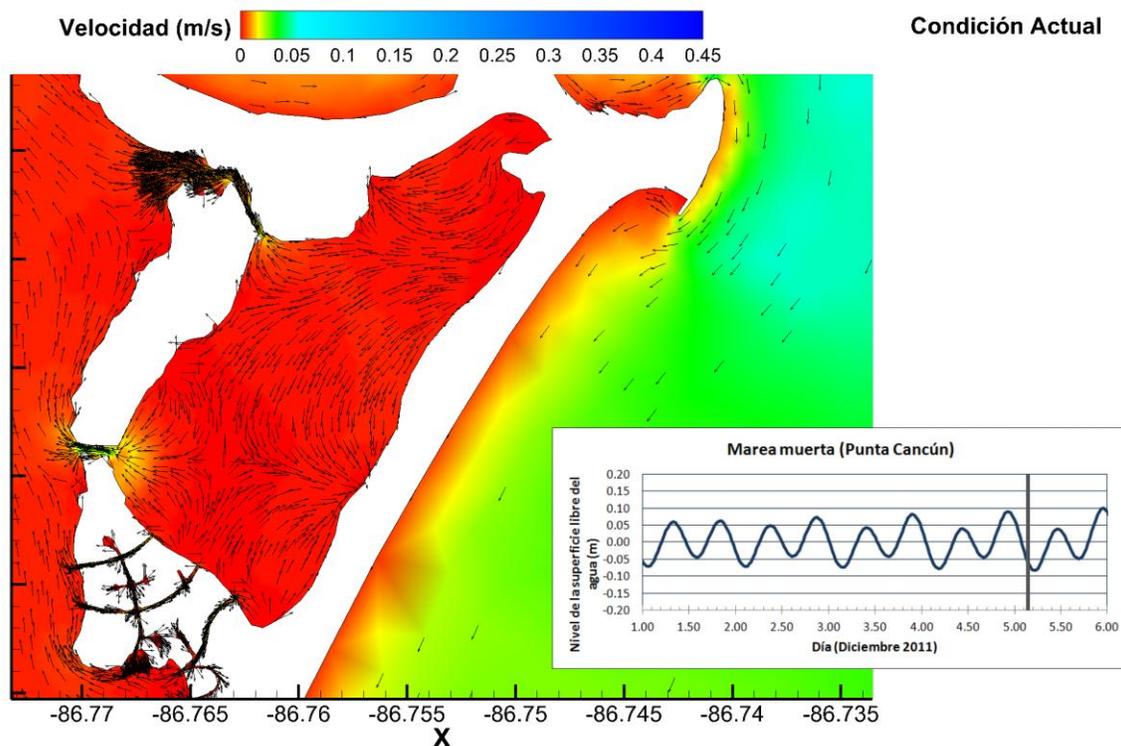


Figura 5.2.27 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 05/Dic/2011 03:00 hr (tiempo GMT).

5.2.5.2 Mareas vivas

El periodo de mareas vivas considerado fue del 21 al 26 de diciembre de 2011 (Figura 5.2.28 a Figura 5.2.30). Para estas condiciones, las velocidades máximas que se desarrollan en los canales que comunican las lagunas de Nichupté y Bojórquez son del orden de los 5 cm/s. Se puede observar que en interior de la laguna de Bojórquez las velocidades también aumentan, aunque el cambio no es mucho. Sin embargo, la parte norte de la laguna sigue presentando velocidades muy pequeñas. Por lo que, la única fuente de movimiento para esa zona es el viento, sin embargo el agua de esa zona tiene un recambio sumamente lento. En general, las velocidades máximas por marea en el interior de la laguna de Bojórquez no rebasan los 2 cm/s.

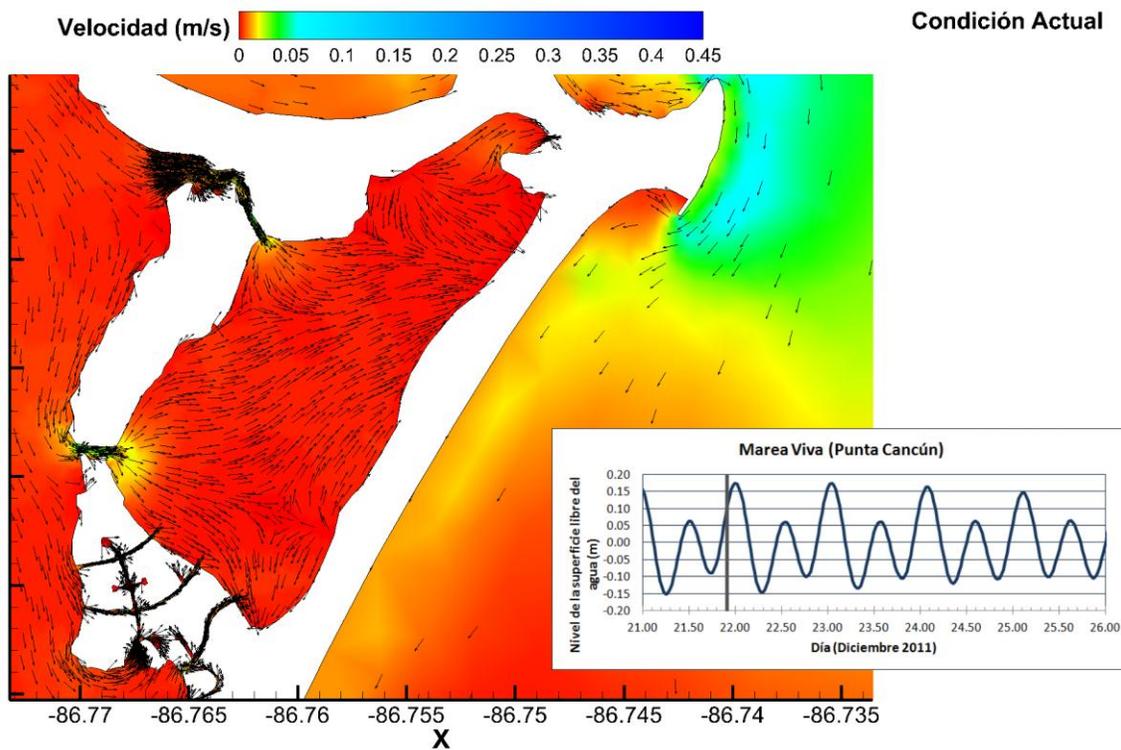


Figura 5.2.28 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 21/Dic/2011 21:30 hr (tiempo GMT).

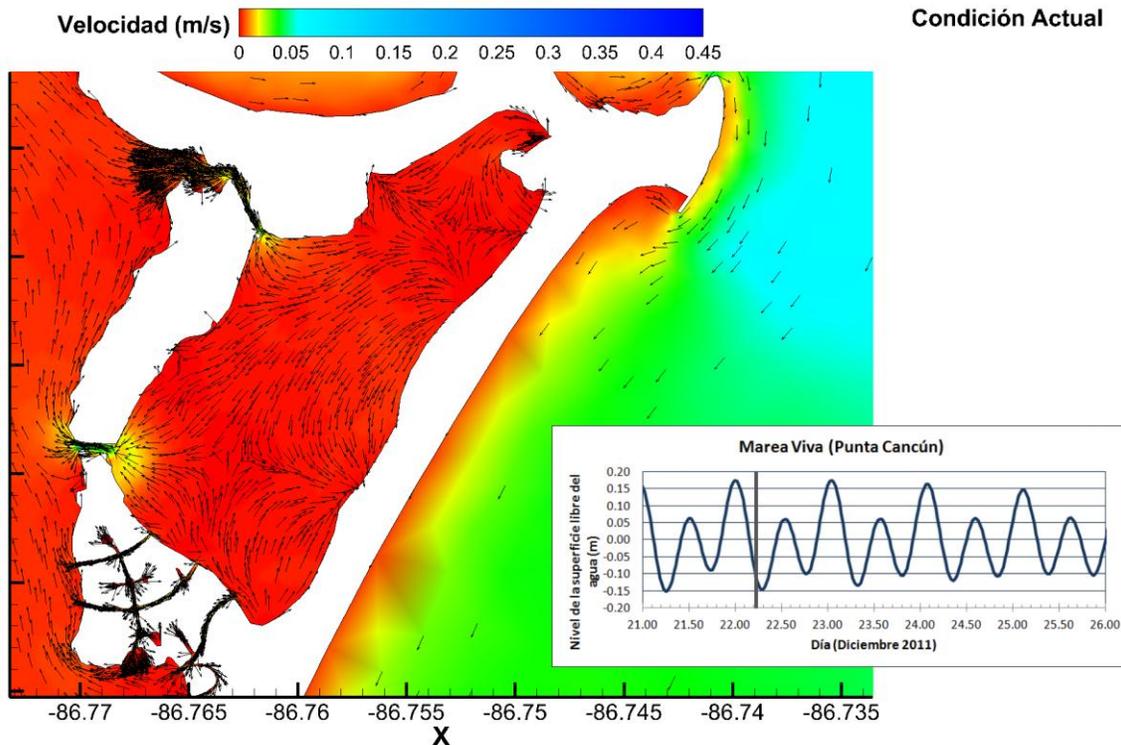


Figura 5.2.29 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 22/Dic/2011 05:00 hr (tiempo GMT).

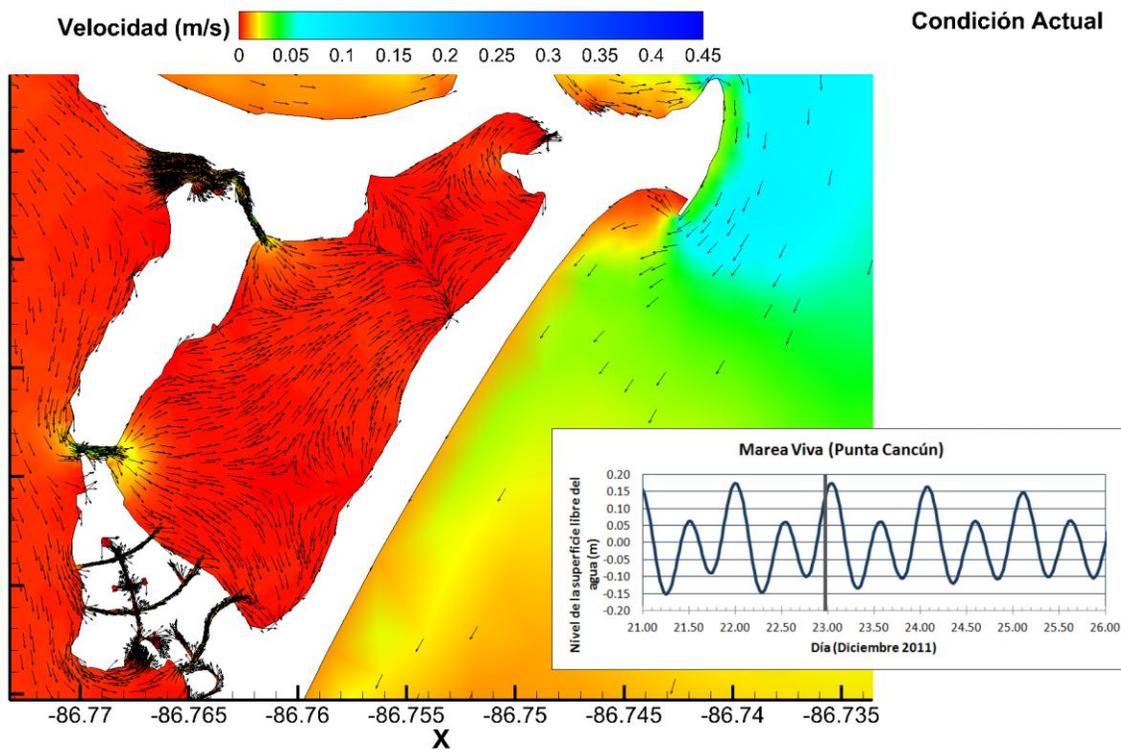


Figura 5.2.30 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 22/Dic/2011 23:00 hr (tiempo GMT).

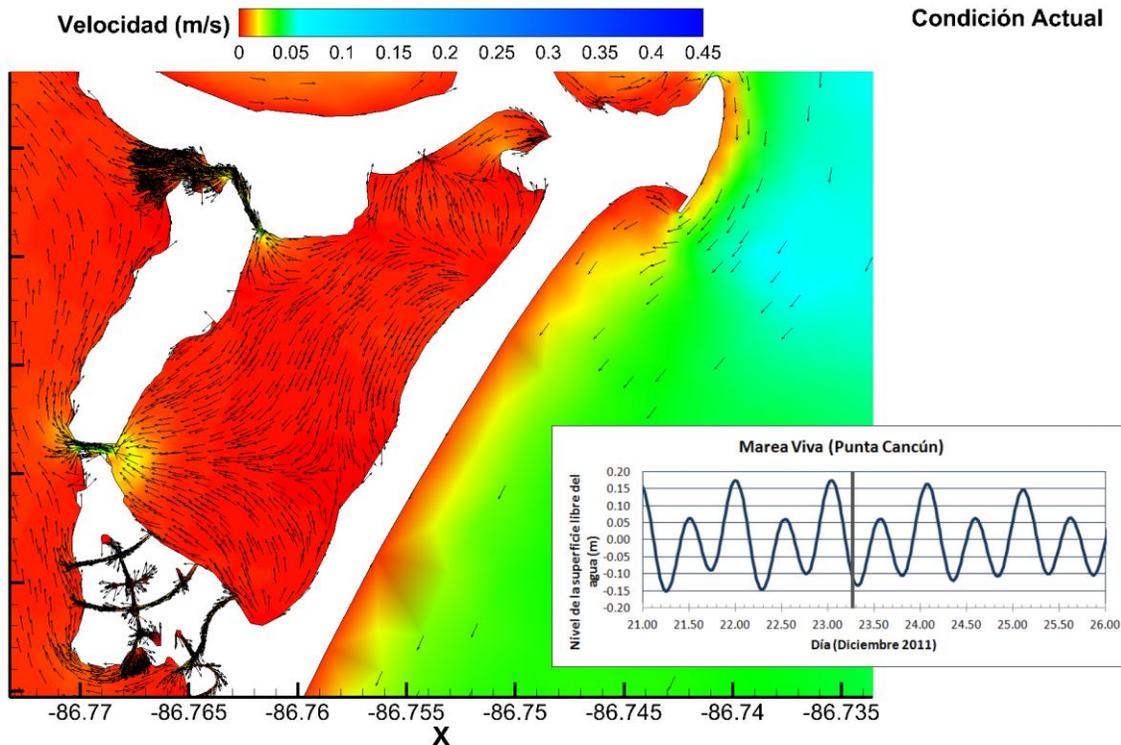


Figura 5.2.31 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 23/Dic/2011 06:00 hr (tiempo GMT).

5.2.5.3 Tiempo de residencia

Como complemento a la simulación hidrodinámica, se determinó el tiempo de residencia en la laguna de Bojórquez, mediante la ecuación (Howes *et al*, 2007):

$$\tau = \frac{V_s T_m}{P_m}$$

Donde τ , es el tiempo de residencia; V_s el volumen de agua del sistema; T_m el periodo de la marea (24.83 hr para el presente estudio); P_m el prisma de la marea.

Para evaluar el prisma de marea se contabilizó durante todo el mes de diciembre de 2011, los volúmenes de entrada y salida en los cinco canales que comunican la laguna de Nichupté con la laguna de Bojórquez (Figura 5.2.32), utilizando los resultados obtenidos mediante la modelación numérica. **Con los cuales se obtuvo un tiempo de residencia de 108 días.**

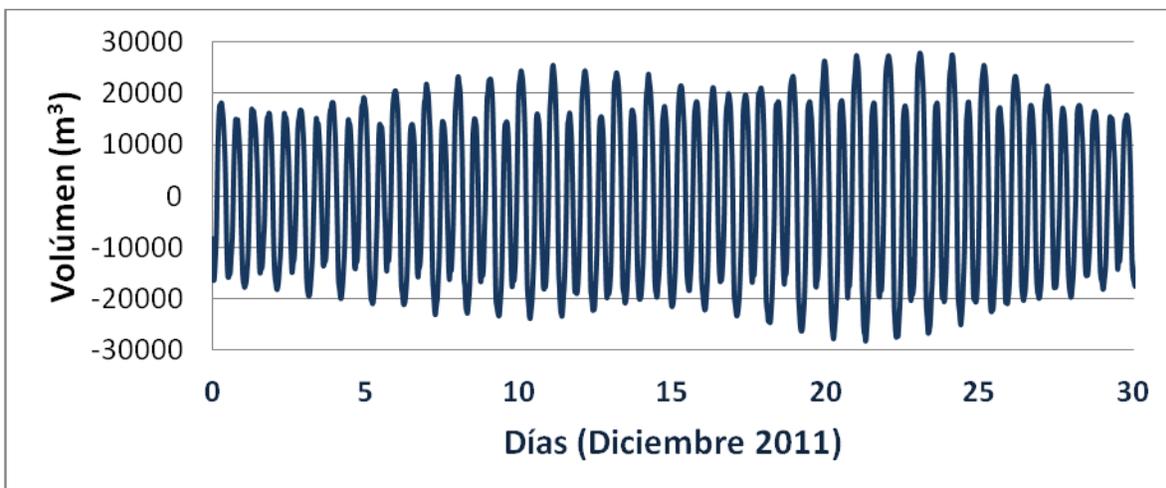


Figura 5.2.32 Volúmenes de entrada y salida en la laguna de Bojórquez. Condición actual.

5.2.6 Hidrodinámica en condiciones de proyecto. Escenario 1: Canal de 6 m de ancho con 2.5 m de profundidad.

Para la simulación de los escenarios de proyecto, se utilizó la misma extensión de dominio que para la condición actual (Figura 5.2.17). En el caso de la simulación con el canal de 6 m su utilizaron 45647 nodos y 83935 elementos (Figura 5.2.33). El periodo de simulación corresponde al periodo de simulación de las condiciones actuales, esto con el fin de evaluar las condiciones hidrodinámicas y los tiempos de residencia bajo las mismas condiciones de marea.

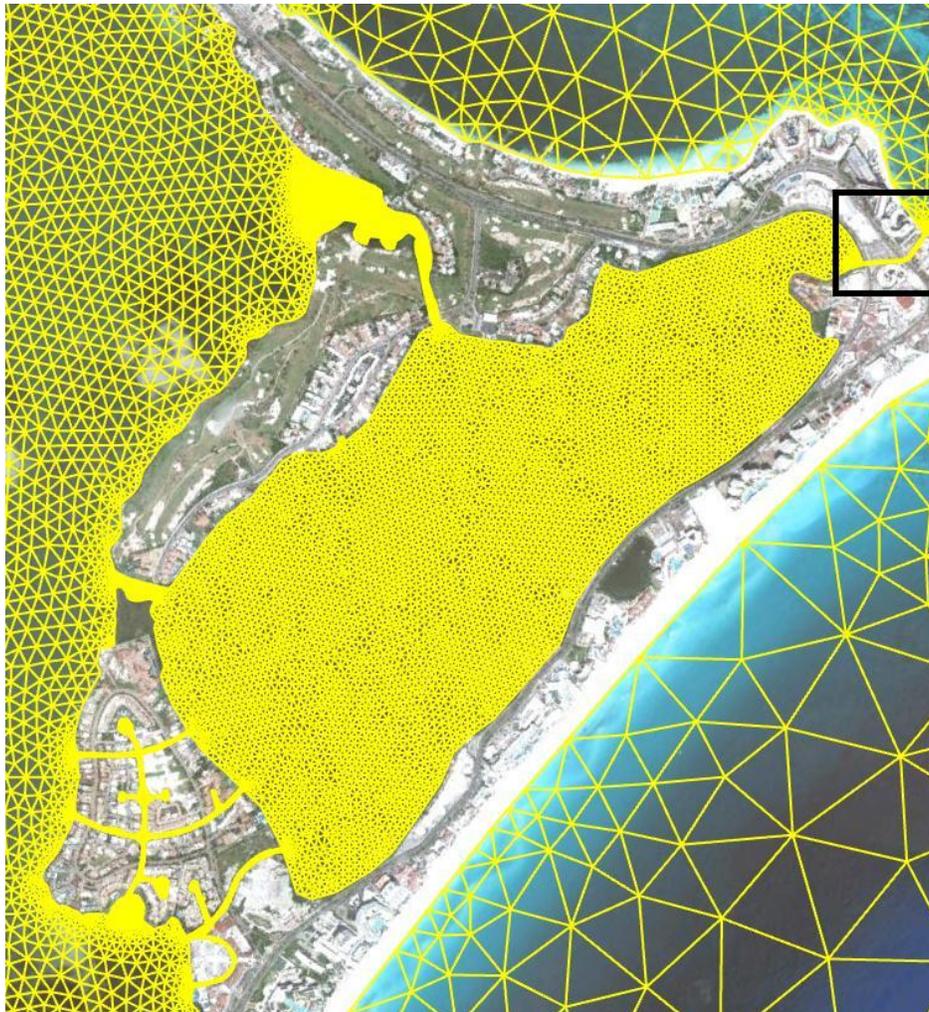


Figura 5.2.33 Vista de la malla para laguna de Bojórquez y el canal de comunicación.

5.2.6.1 Mareas muertas

Para este escenario de simulación, se observa que el canal de permite el intercambio de agua entre el mar caribe y la laguna de Bojórquez (Figura 5.2.34 a Figura 5.2.37). La parte norte de la última pasa de tener una hidrodinámica prácticamente nula a presentar velocidades de hasta 0.1 m/s. Durante mareas muertas, el canal aparenta tener influencia hasta la zona del canal norte de la isla de Pok-ta-pok. Pero como se verá más adelante, en comparaciones puntuales entre condiciones actuales y los escenarios de proyecto, su influencia se extiende hasta los canales de isla dorada.

Para este escenario ya en mareas muertas, se ve un mejoramiento significativo en las condiciones hidrodinámicas incluso en comparación de la hidrodinámica en mareas vivas para las condiciones actuales. Lo cual demuestra el potencial del canal para la reducción de los tiempos de residencia en la laguna de Bojórquez.

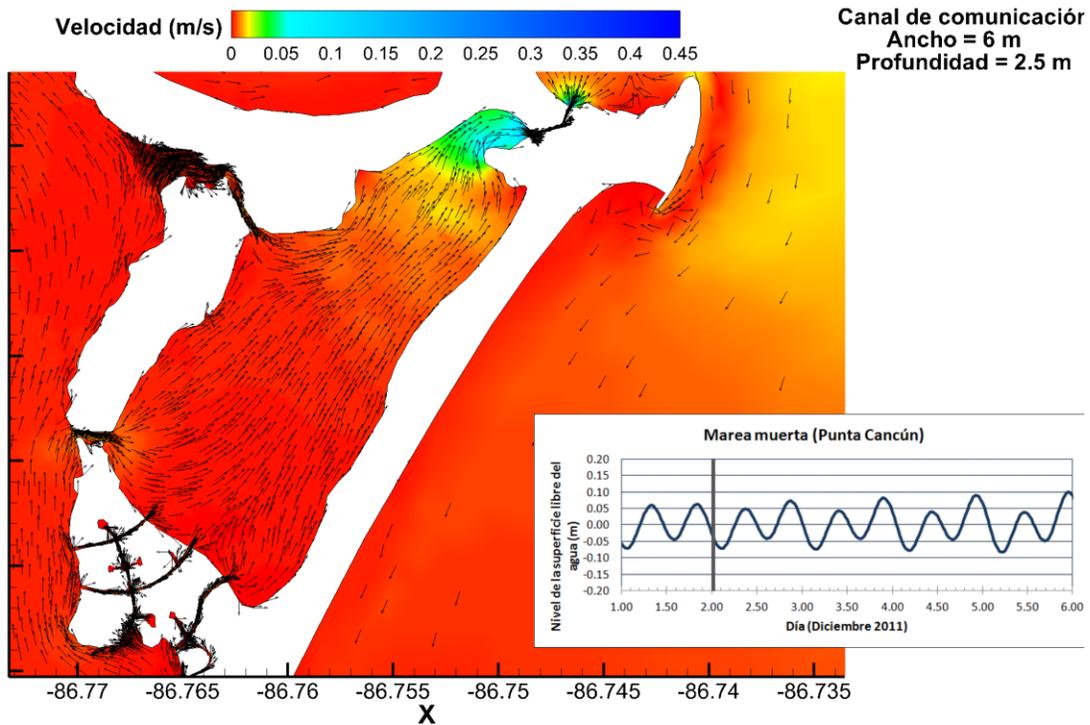


Figura 5.2.34 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 02/Dic/2011 00:00 hr (tiempo GMT).

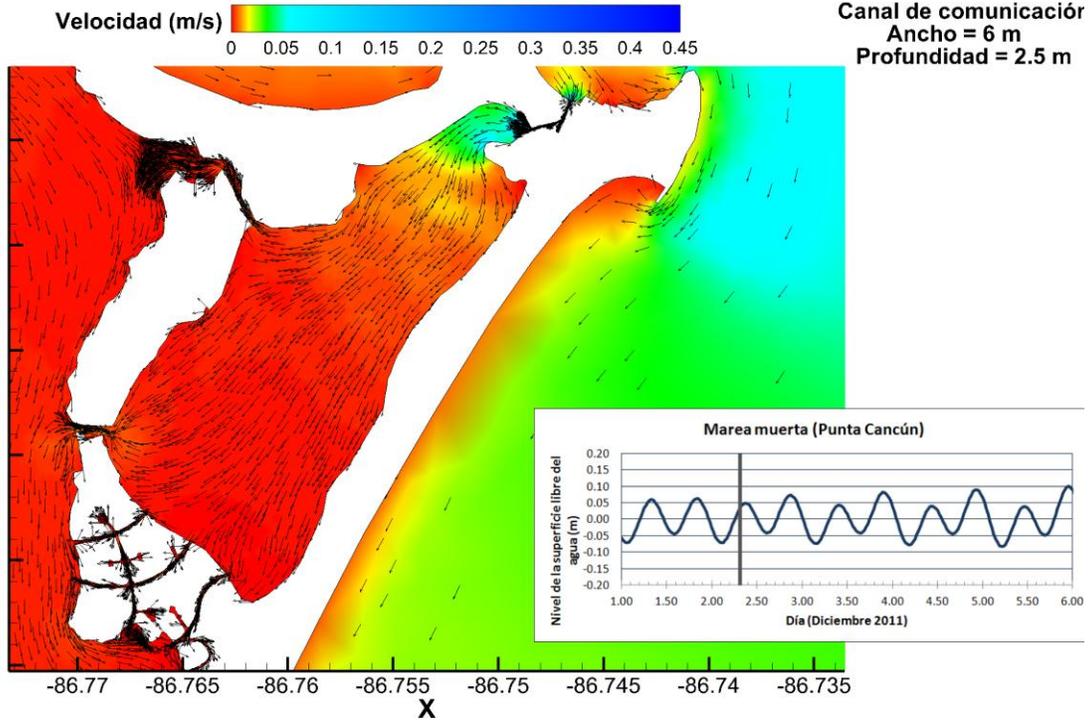


Figura 5.2.35 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 02/Dic/2011 07:00 hr (tiempo GMT).

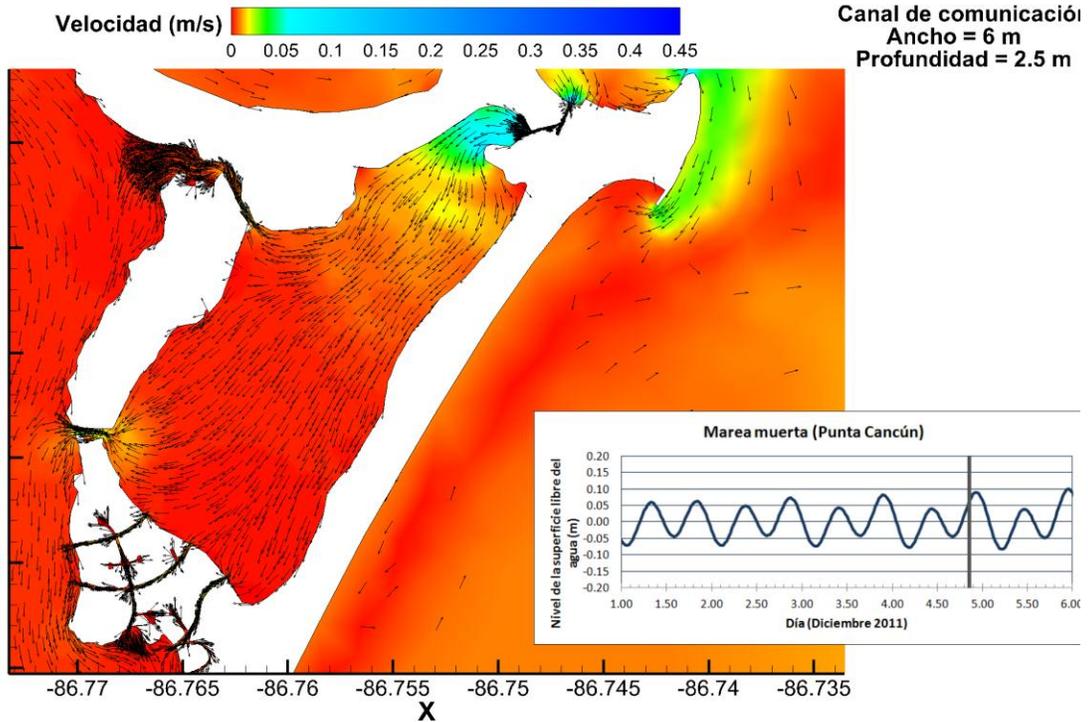


Figura 5.2.36 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 04/Dic/2011 20:00 hr (tiempo GMT).

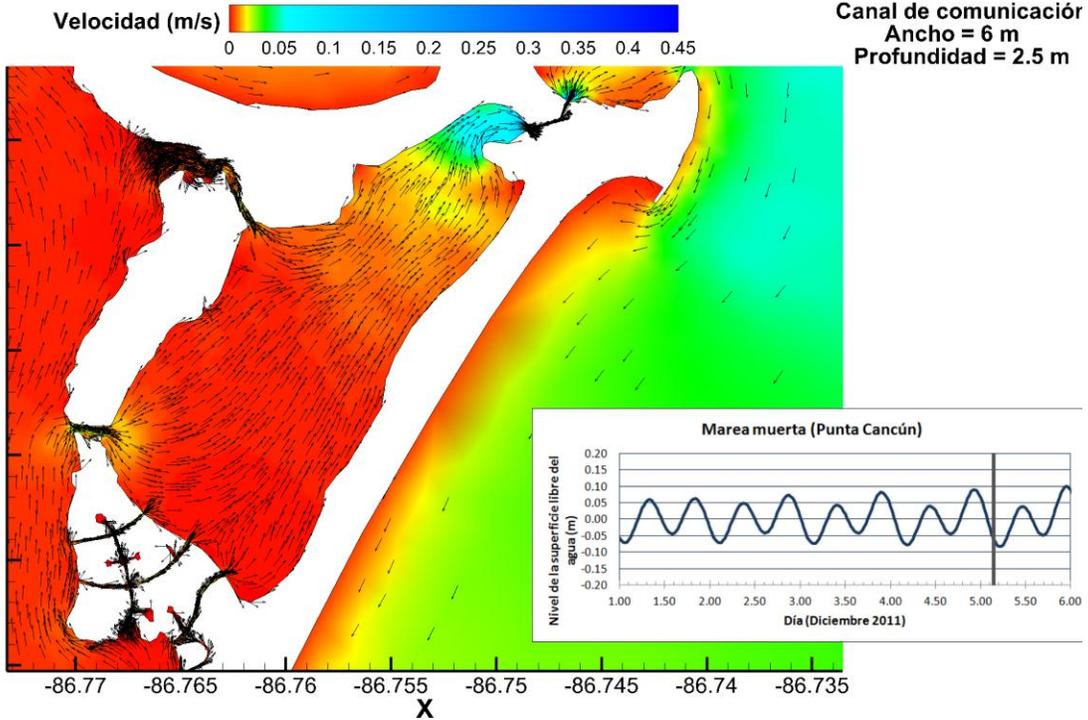


Figura 5.2.37 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 05/Dic/2011 03:00 hr (tiempo GMT).

5.2.6.2 Mareas vivas

Para las condiciones de marea viva (Figura 5.2.38 a Figura 5.2.41), las velocidades se intensifican tanto en la parte norte de la laguna de Bojórquez como en la parte sur de la misma. La magnitud de velocidad y la extensión de la zona de influencia en los canales que comunican la laguna de Bojórquez con la laguna de Nichupté son prácticamente iguales que durante el periodo de mareas vivas en la condición actual.

Tanto para condiciones de marea viva como marea muerta, el flujo tiende a hacerse paralelo a lo largo de la laguna, con excepción de la parte sur (cerca de los canales de isla dorada). Con este canal, debido al intercambio de agua en la parte norte, el tiempo de residencia de la laguna de Bojórquez será menor.

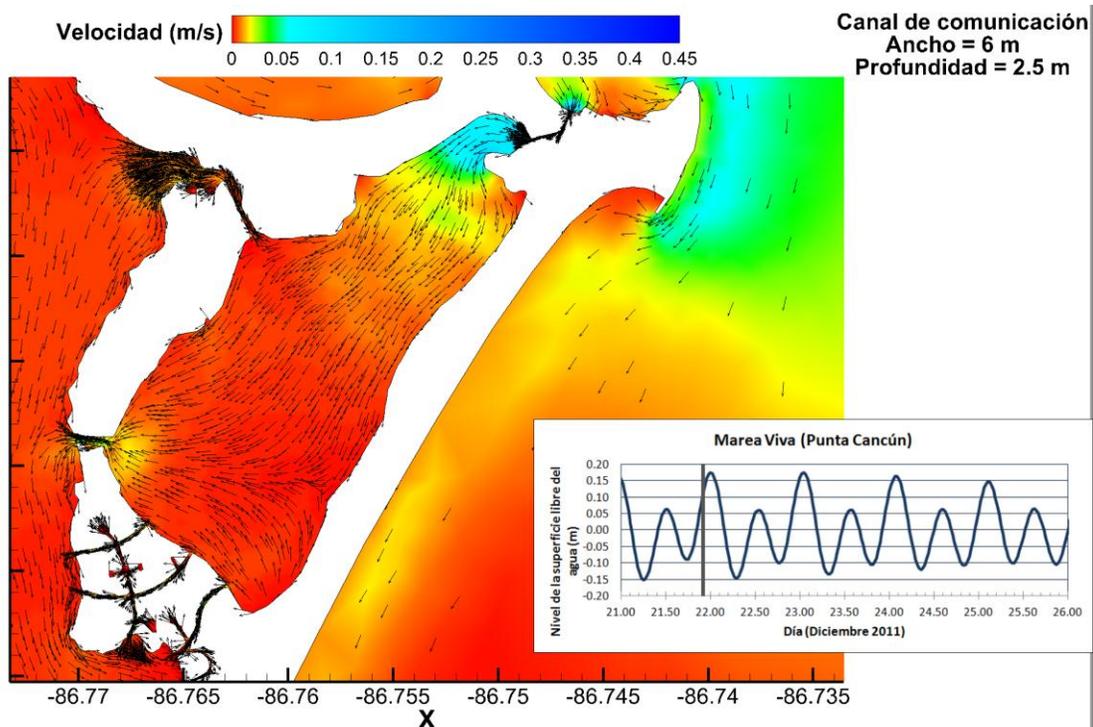


Figura 5.2.38 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 21/Dic/2011 21:30 hr (tiempo GMT).

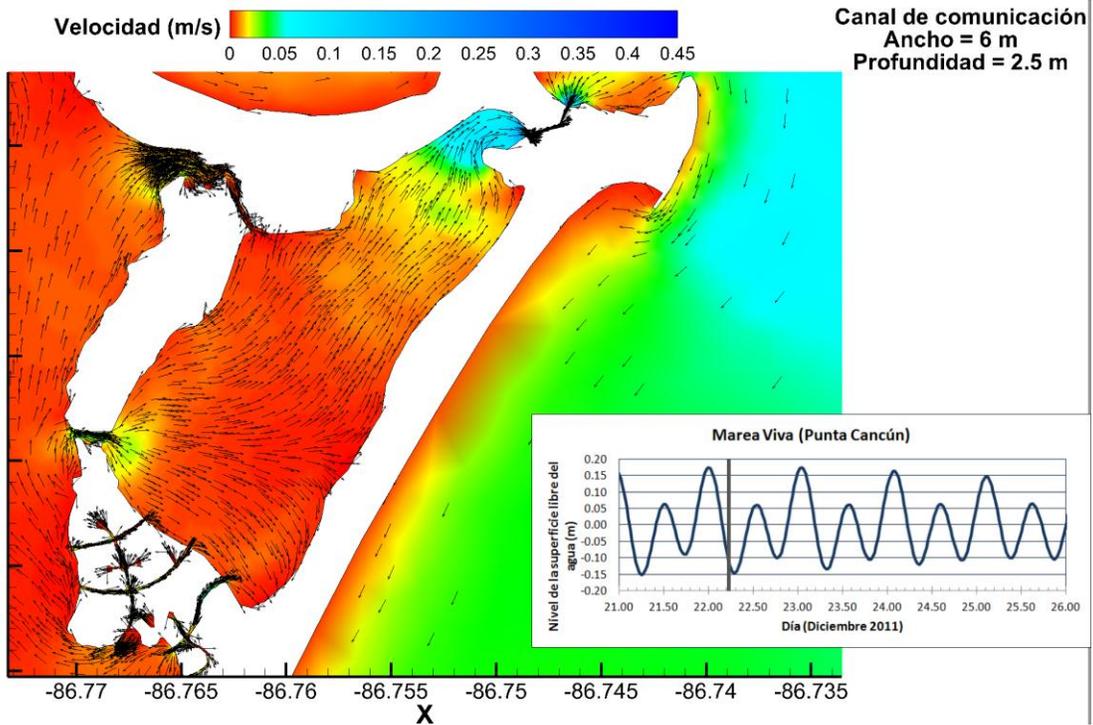


Figura 5.2.39 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 22/Dic/2011 05:00 hr (tiempo GMT).

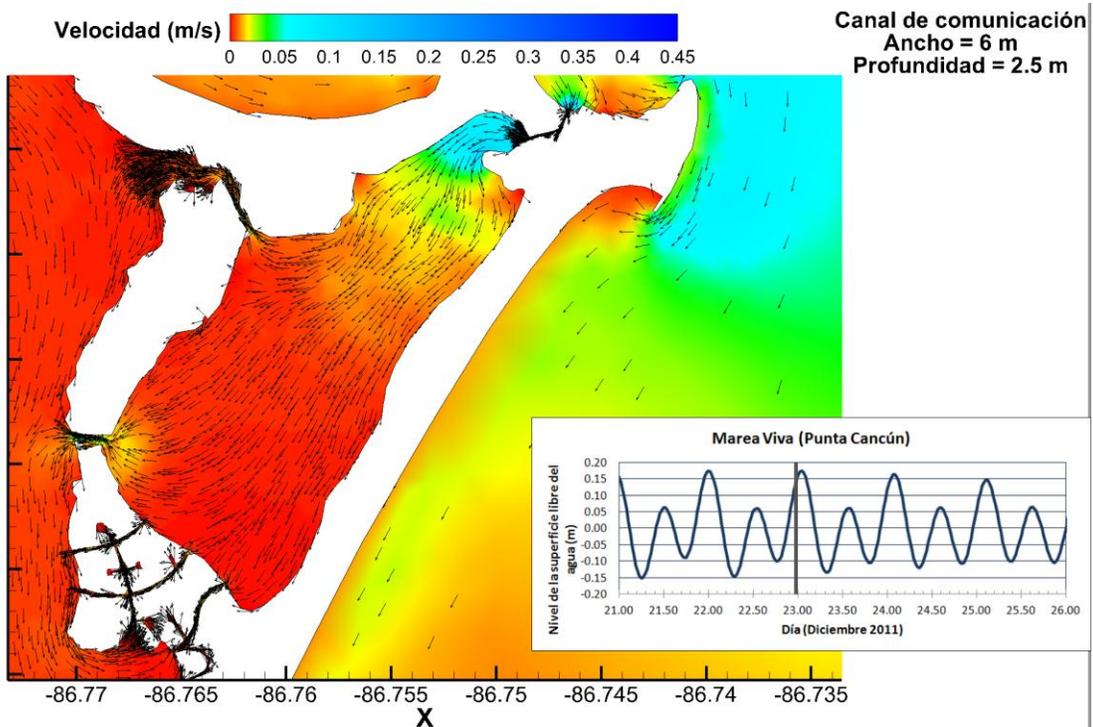


Figura 5.2.40 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 22/Dic/2011 23:00 hr (tiempo GMT).

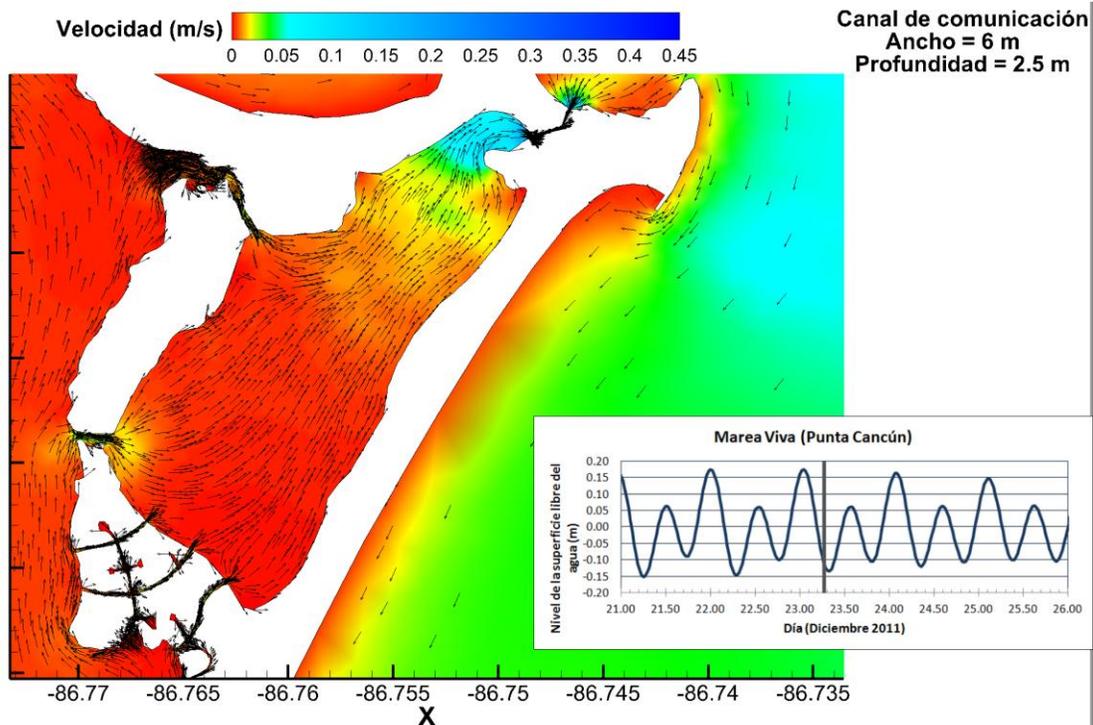


Figura 5.2.41 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 23/Dic/2011 06:00 hr (tiempo GMT).

5.2.6.3 Tiempo de residencia

De la misma manera que en condiciones actuales, se evaluaron los volúmenes de entrada y salida tanto en los canales de Pok-ta-pok e isla dorada (Figura 5.2.42), como en el canal de comunicación con 6 m de ancho (Figura 5.2.43). La evaluación se hizo de manera separada con el fin de determinar la influencia entre en intercambio de agua entre las lagunas de Bojórquez y Nichupté.

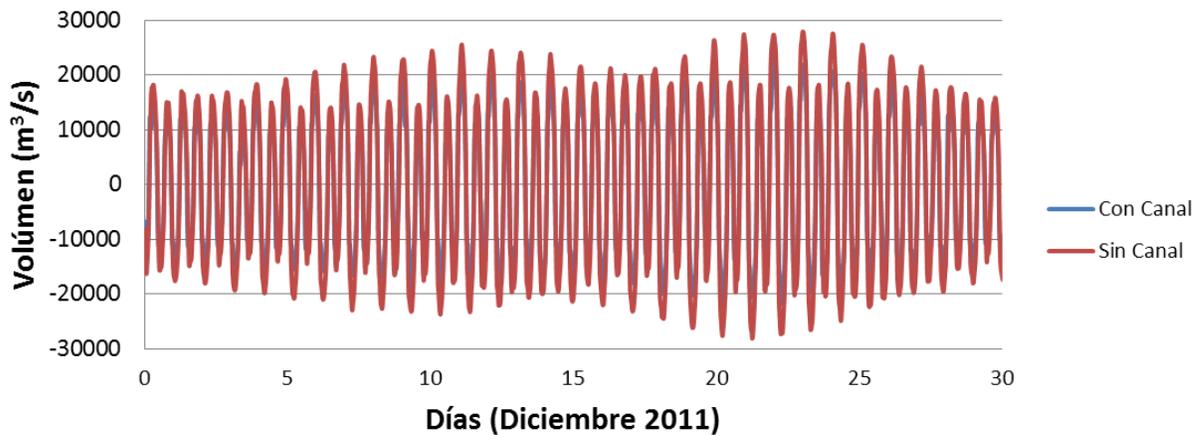


Figura 5.2.42 Volúmenes de entrada y salida en los canales de Pok-ta-pok e isla dorada.

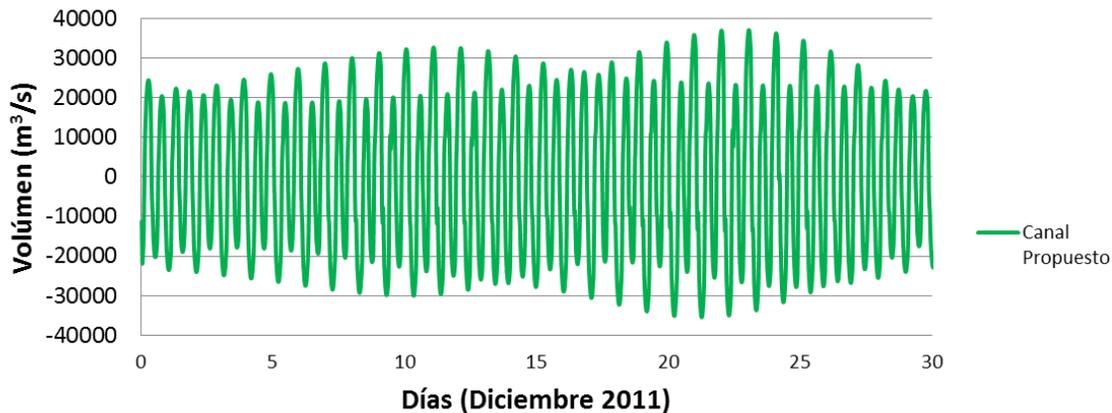


Figura 5.2.43 Volúmenes de entrada y salida en el canal de 6 m.

Puede observarse, que con el canal de 6 m de ancho, los volúmenes de intercambio entre las lagunas de Bojórquez y Nichupté no varían significativamente en comparación de las condiciones actuales. Sin embargo, los volúmenes de entrada y salida en el canal de comunicación son ligeramente mayores.

Para esta condición de proyecto y periodo de simulación, el tiempo de residencia teórico es de 54 días. Lo que representa la mitad del tiempo de residencia teórico para condiciones actuales. La parte norte de la laguna tendrá una dinámica mayor y será remplazada rápidamente.

5.2.7 Hidrodinámica en condiciones de proyecto. Escenario 2: Canal de 10 m de ancho con 2.5 m de profundidad.

Para evaluar la propuesta del canal de 10 m, se utilizó una malla de 44519 nodos y 81723 elementos (Figura 5.2.44). El periodo de simulación y las forzantes de marea fueron las mismas que para las condiciones actuales y que para el canal de 6 m. fue el mismo que para condiciones actuales.



Figura 5.2.44 Vista en perspectiva de la ubicación del canal de 10 m. (Modificado de Google Earth)

5.2.7.1 Mareas muertas

Las velocidades inducidas por marea en la laguna de Bojórquez durante el periodo de mareas muertas para esta condición de proyecto (canal de 10 m), son mayores a las velocidades que se generan en mareas vivas para el canal de 6 m (Figura 5.2.45 a Figura 5.2.48). Esto no solo en la parte norte de la laguna, sino también en los canales norte y sur de la isla Pok-ta-pok y los canales ubicados en isla dorada.

Para este periodo de simulación, los gradientes de la superficie libre del agua llegar a ser lo suficientemente fuerte para orientar el flujo a lo largo de la laguna de Bojórquez.

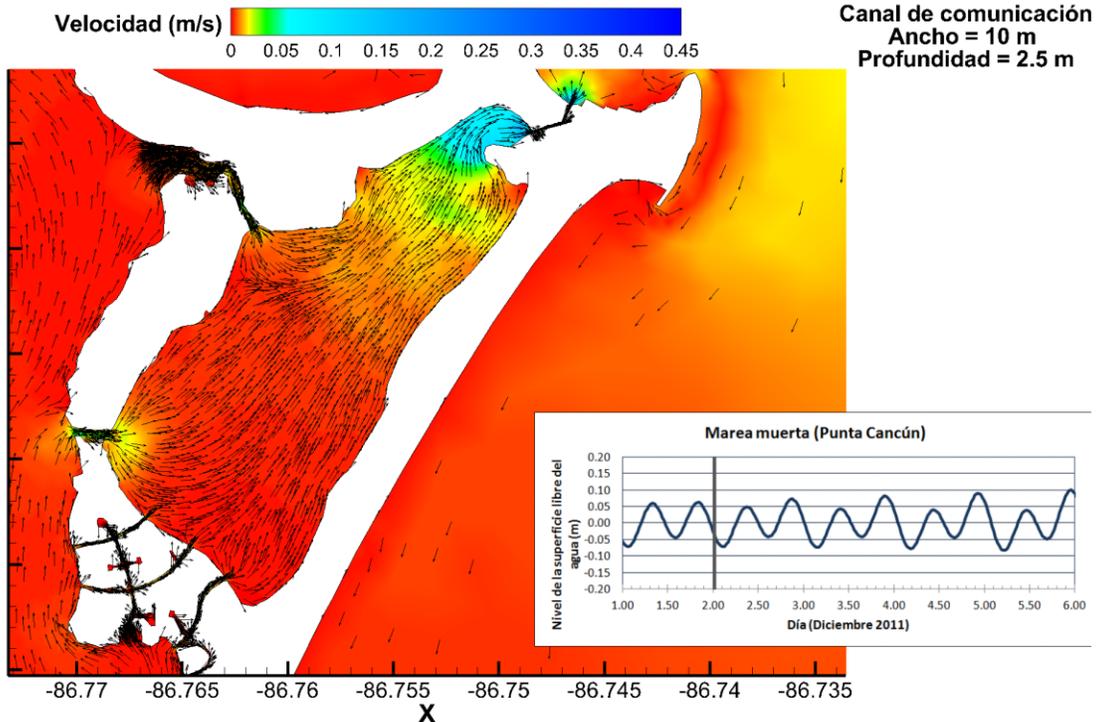


Figura 5.2.45 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 02/Dic/2011 00:00 hr (tiempo GMT).

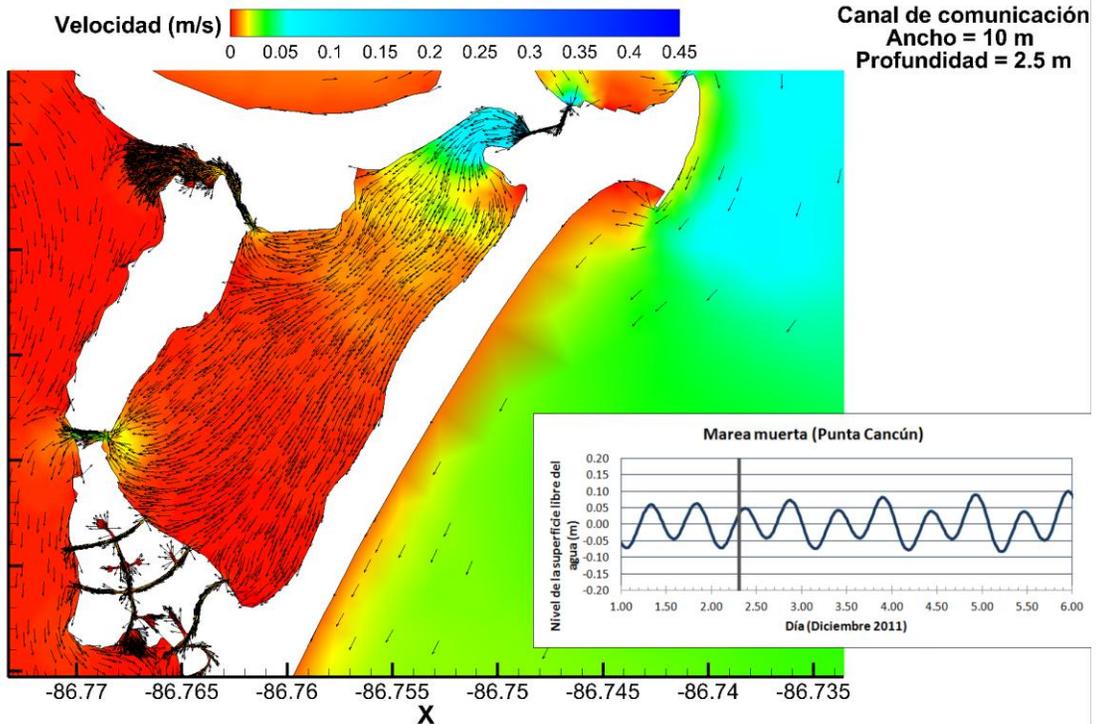


Figura 5.2.46 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 02/Dic/2011 07:00 hr (tiempo GMT).

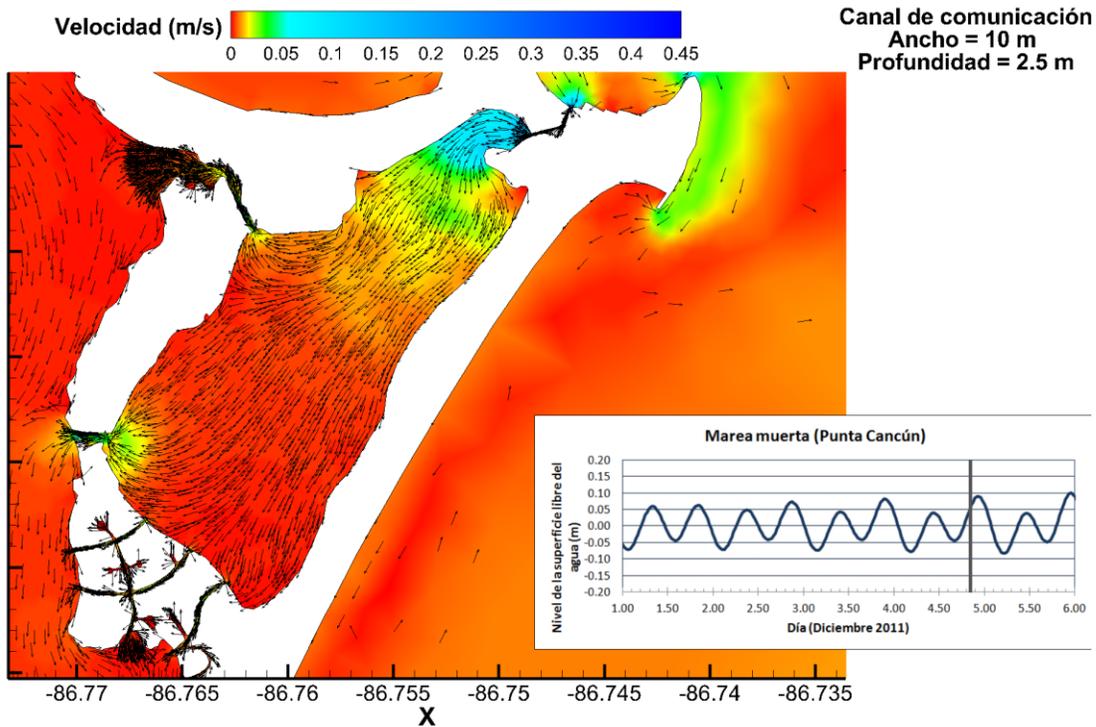


Figura 5.2.47 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 04/Dic/2011 20:00 hr (tiempo GMT).

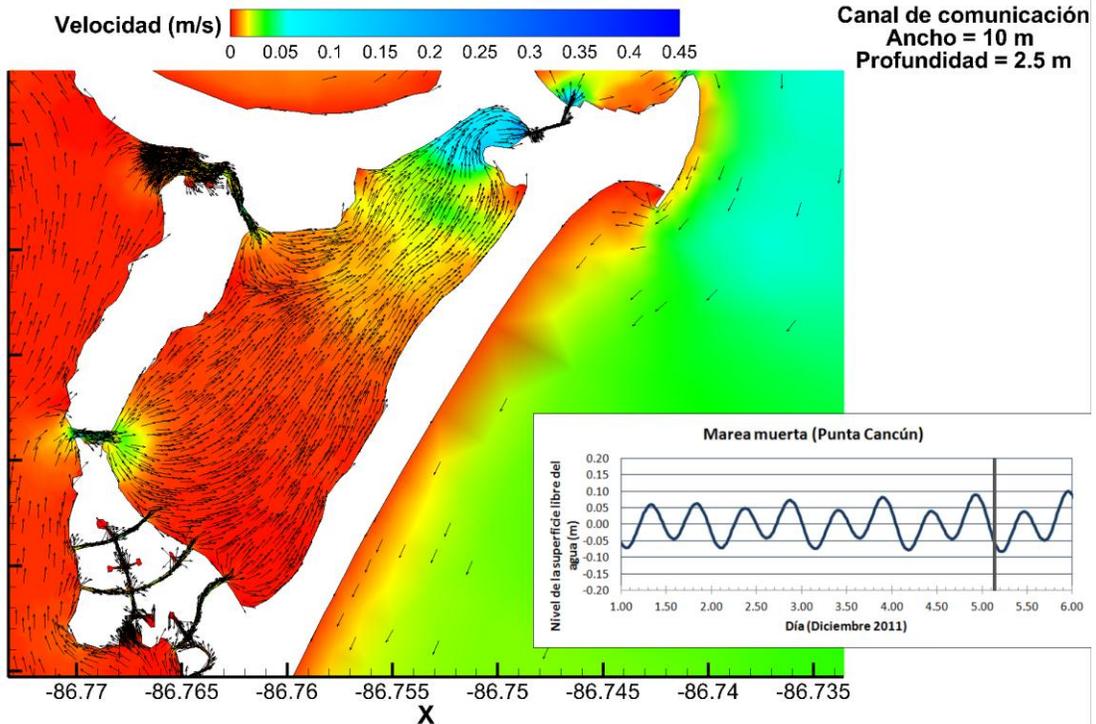


Figura 5.2.48 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 05/Dic/2011 03:00 hr (tiempo GMT).

5.2.7.2 Mareas vivas

Durante el periodo de mareas vivas (Figura 5.2.49 a Figura 5.2.52), puede observarse que el canal de 10 m de ancho tiene una influencia muy grande sobre la laguna de Bojórquez. Esto porque al subir (o bajar) el nivel del mar en la nueva boca de apertura, se logra marcar un gradiente en la superficie libre que hace que toda la masa de la laguna se mueva en una sola dirección, el cual es más intenso que para las condiciones de marea muerta. Bajo estas condiciones la zona central de la laguna de Bojórquez llega a tener velocidades

Las zonas de influencia de los canales norte y sur de la isla Pok-ta-pok crecen tanto del lado de la laguna de Bojórquez como en el lado de la laguna de Nichupté, lo cual mejorará notablemente el intercambio que existe actualmente entre la laguna de Bojórquez y Nichupté.

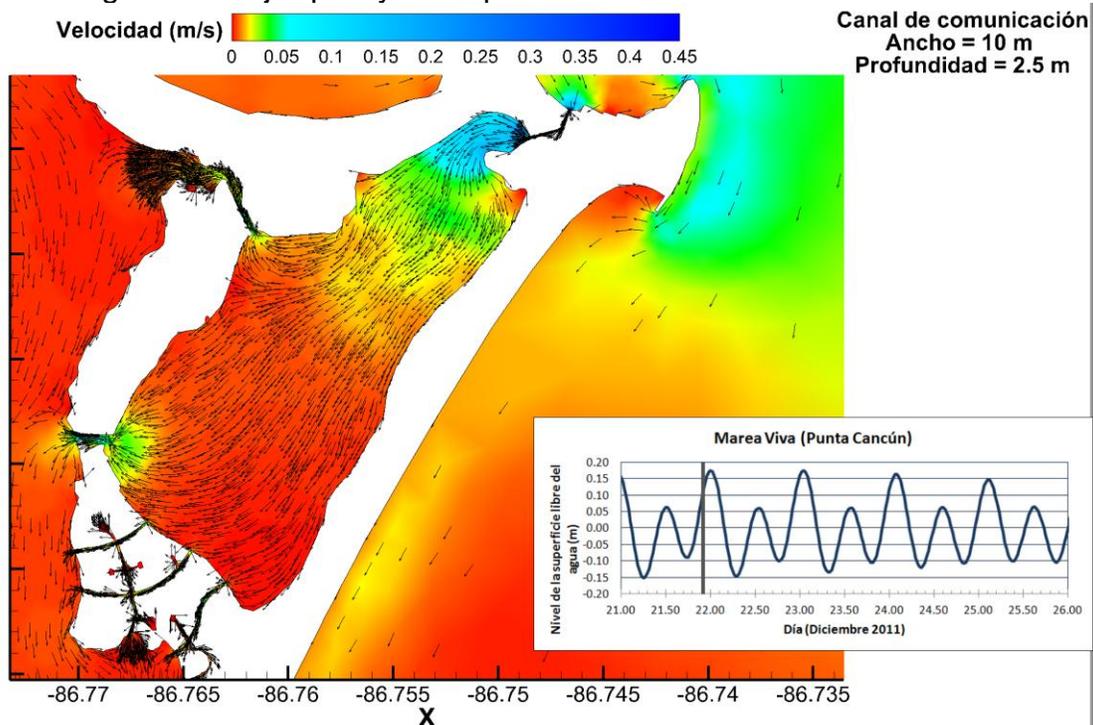


Figura 5.2.49 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 21/Dic/2011 21:30 hr (tiempo GMT).

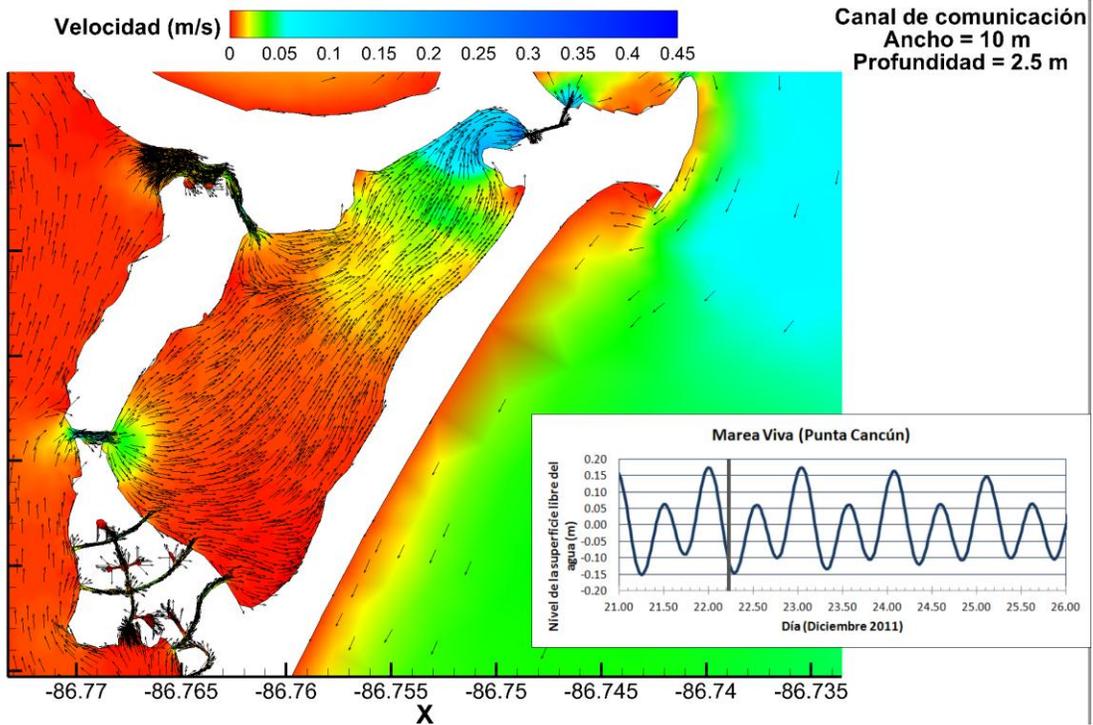


Figura 5.2.50 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 22/Dic/2011 05:00 hr (tiempo GMT).

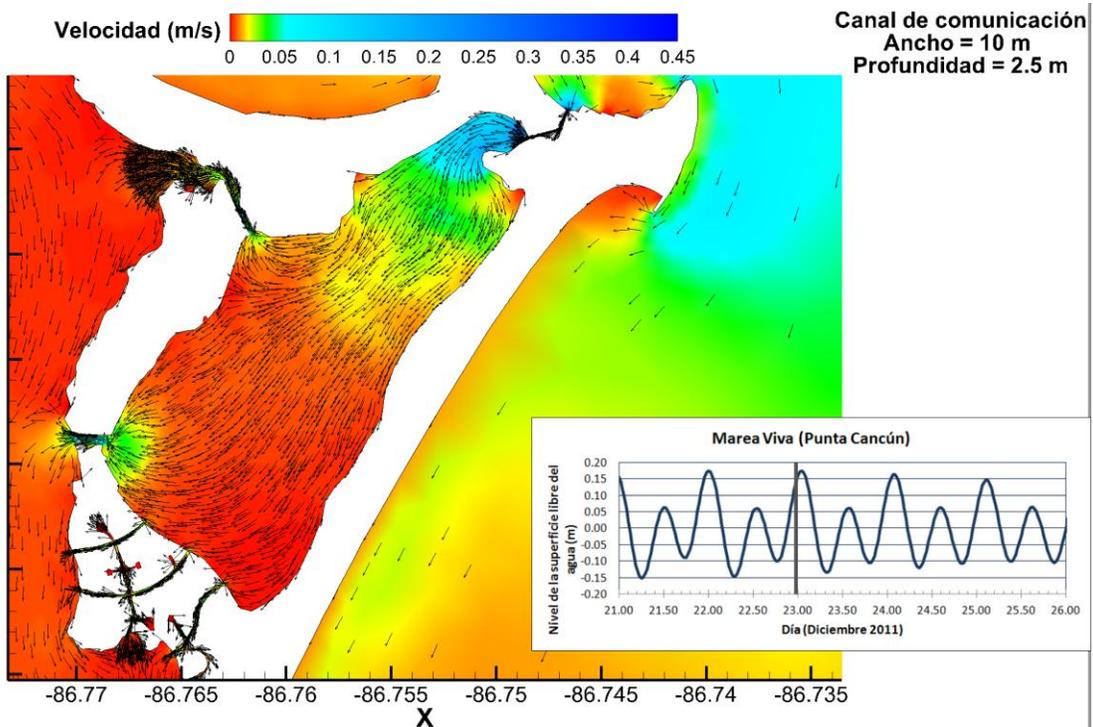


Figura 5.2.51 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 22/Dic/2011 23:00 hr (tiempo GMT).

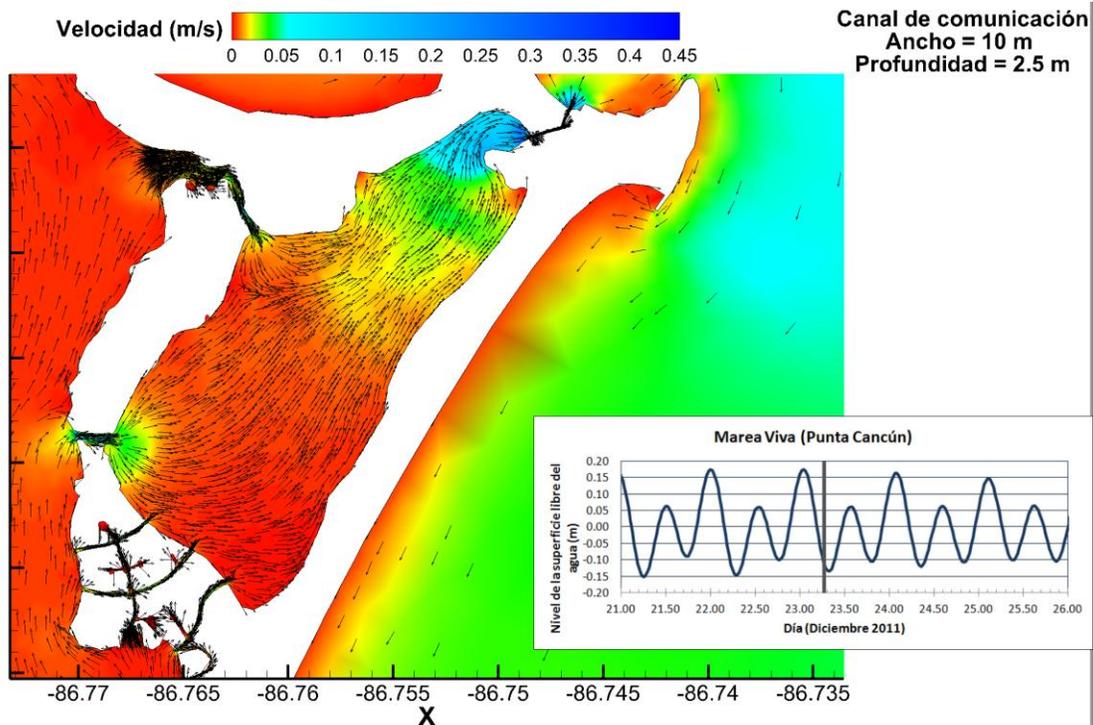


Figura 5.2.52 Distribución de velocidades en la laguna de Bojórquez. 23/Dic/2011 06:00 hr (tiempo GMT).

5.2.7.3 Tiempo de residencia

Para esta condición de proyecto, el tiempo de residencia teórico se redujo a 34 días. Lo cual representa prácticamente un tercio del tiempo de residencia teórico en condiciones actuales.

A diferencia del canal de 6 m, en el canal de 10 m los volúmenes de intercambio entre la lagunas de Bojórquez y Nichupté son mayores al que se presenta en condiciones actuales (Figura 5.2.53). Ese volumen de intercambio es tan importante como el volumen de intercambio a través del canal de comunicación (Figura 5.2.54), en otras palabras, dichos volúmenes son del mismo orden de magnitud.

Tanto para mareas muertas como vivas, el intercambio de agua en la laguna de Bojórquez a través del canal de comunicación será tan importante como el que se realiza en con la laguna de Nichupté, condición que no se presentaba en el caso del canal de 6 m. Esta es una mejor condición para el sistema, ya que la masa de agua que entre por el canal de comunicación también ingresará a la laguna de Nichupté y viceversa.

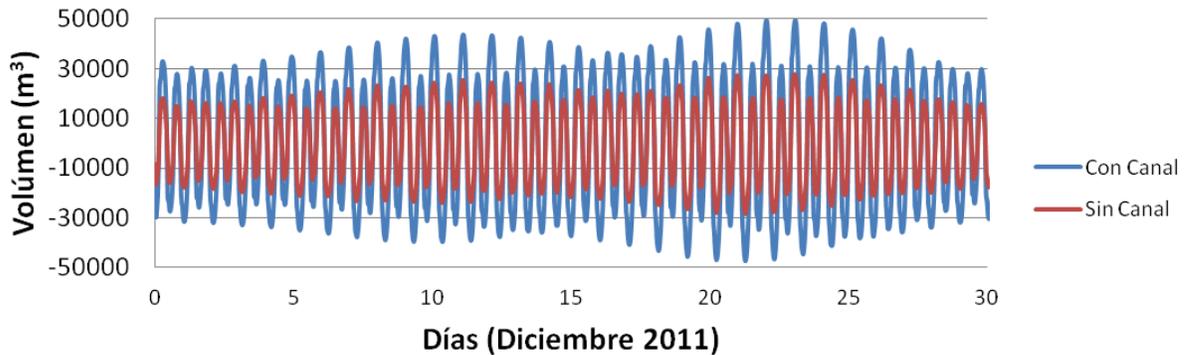


Figura 5.2.53 Volúmenes de entrada y salida en los canales de Pok-ta-pok e isla dorada.

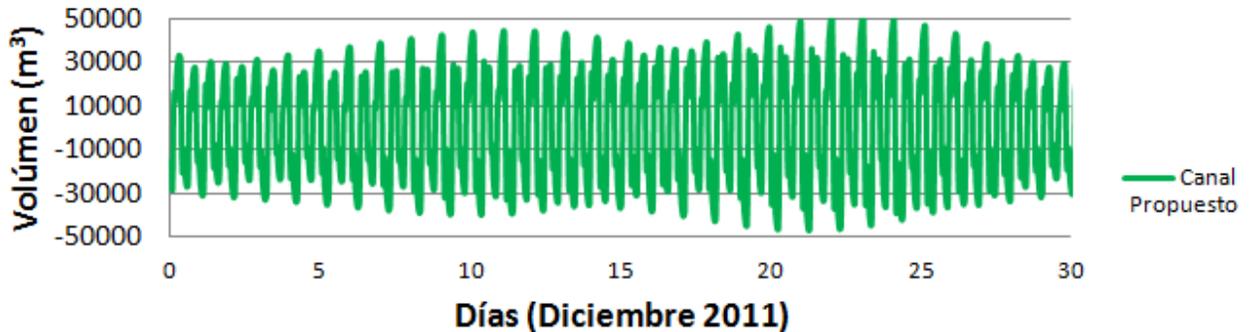


Figura 5.2.54 Volúmenes de entrada y salida en el canal de 10 m.

5.2.8 Comparación cualitativa entre los escenarios de simulación

En la Figura 5.2.55 se muestra la comparación entre las velocidades que se presentan en condiciones actuales y de proyecto, esto considerando el canal de 10 m de ancho y 2.5 de profundidad. La diferencia de movimiento de masa de agua es muy marcada, ya que las velocidades inducidas por marea en la condición actual de la laguna de Bojórquez son muy bajas en toda la laguna, mientras que con la apertura del canal de comunicación entre el Mar caribe y la laguna de Bojórquez, las velocidades aumentan en toda ella.

Para obtener una comparación cuantitativa entre los escenarios de simulación, se extrajeron los valores de velocidad en ocho puntos distintos de la laguna de Bojórquez (Figura 5.2.56), cuyos datos se muestran de la Figura 4.41 a la Figura 4.48. Puede observarse que en los canales de Pok-ta-pok las velocidades llegan a ser 1.5 veces mayores que las que se presentan en condiciones actuales (Figura 5.2.57), mientras que en los canales de isla dorada llegan a ser hasta de 1.5 a 4

veces mayores (Figura 5.2.59). En la parte norte de la laguna, las velocidades pasan de valores muy pequeños a hasta velocidades de 15 cm/s (Figura 5.2.63).

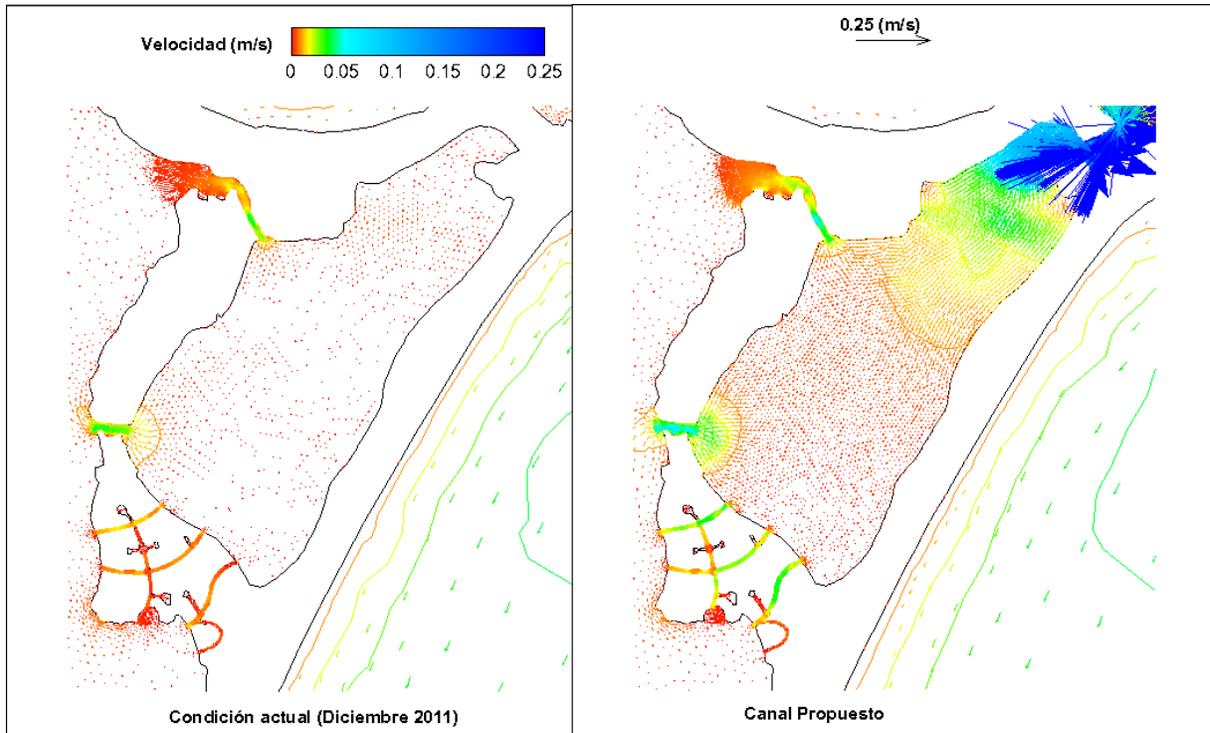


Figura 5.2.55 Comparación de velocidades en condiciones actuales y de proyecto (canal de 10 m). 23/Dic/2011 06:00 hr (tiempo GMT).



Figura 5.2.56 Ubicación de puntos de comparación entre alternativas.

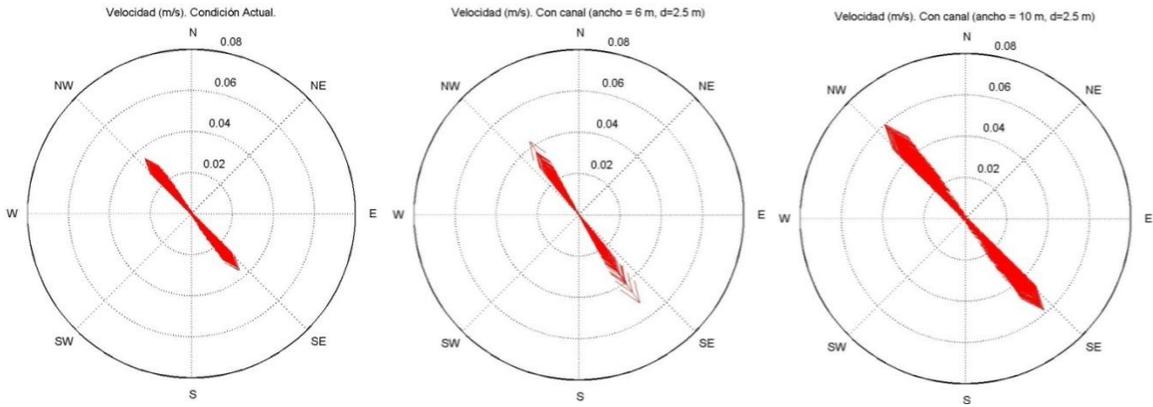


Figura 5.257 Comparación de velocidades en el punto 1.

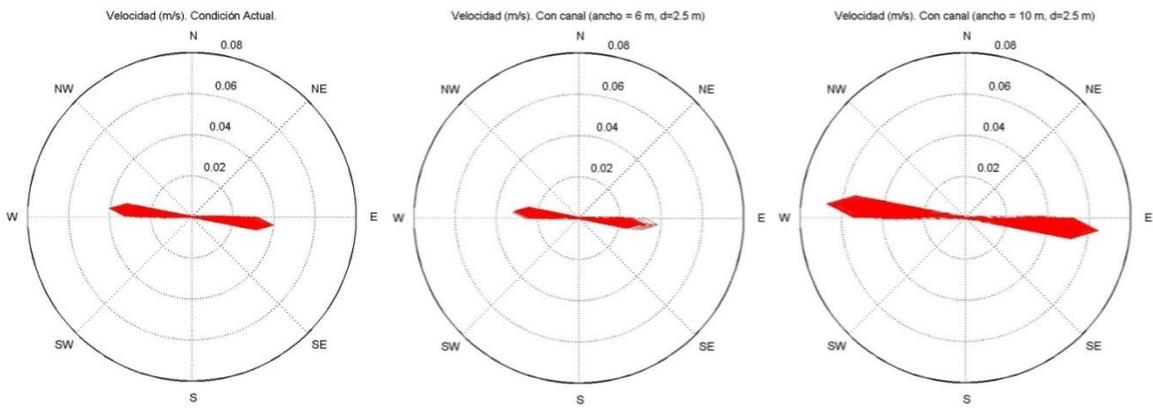


Figura 5.258 Comparación de velocidades en el punto 2

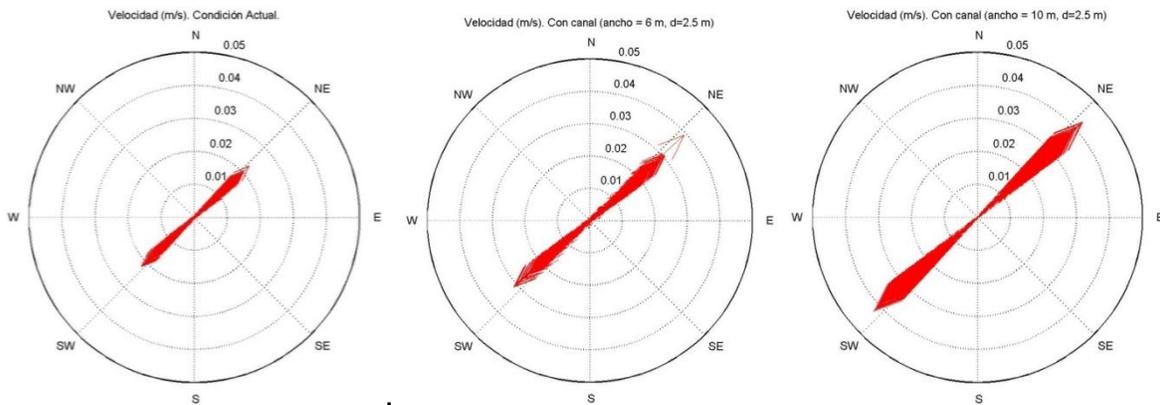


Figura 5.259 Comparación de velocidades en el punto 3.

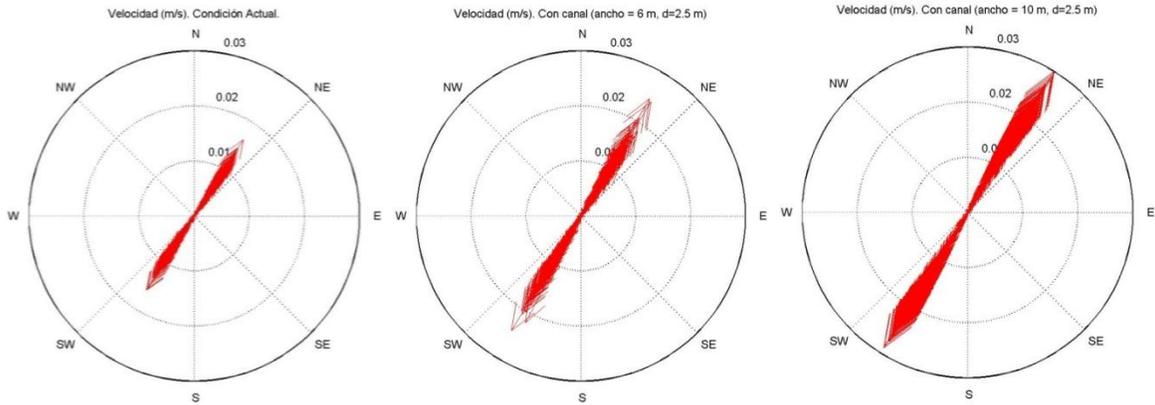


Figura 5.2.60 Comparación de velocidades en el punto 4.

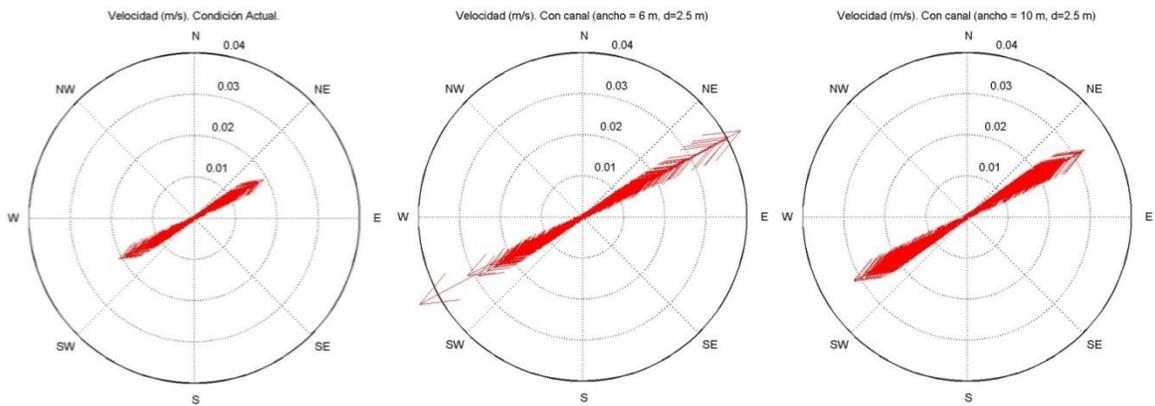


Figura 5.2.61 Comparación de velocidades en el punto 5.

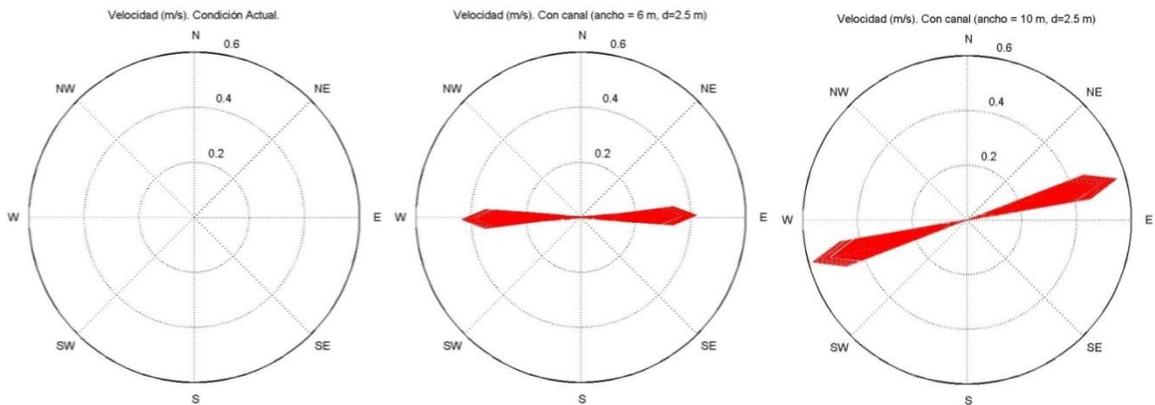


Figura 5.2.62 Comparación de velocidades en el punto 6.

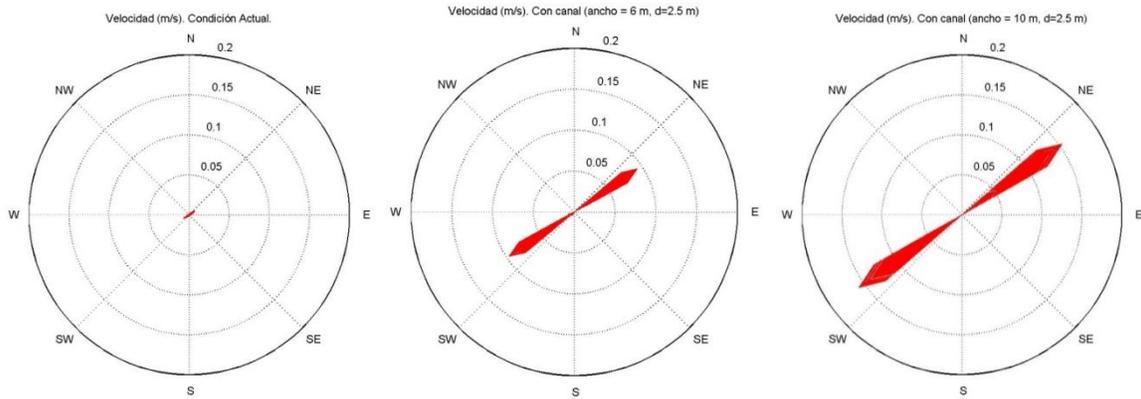


Figura 5.2.63 Comparación de velocidades en el punto 7.

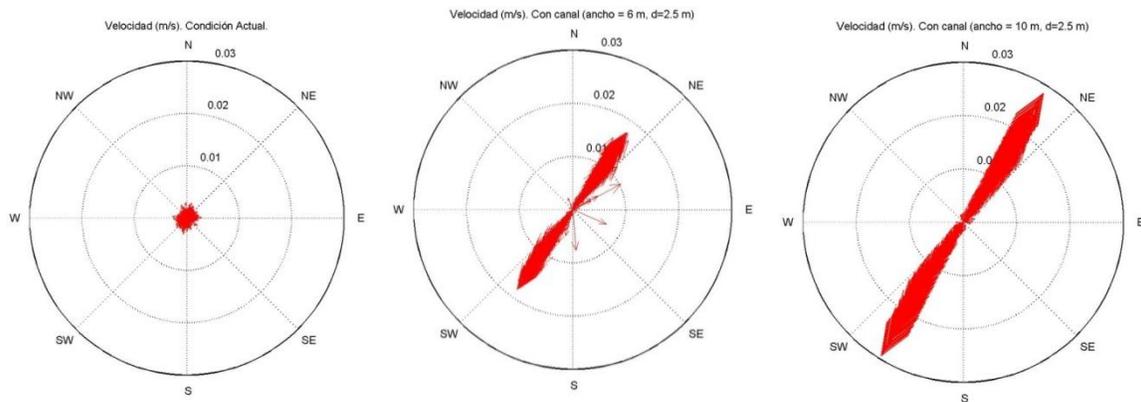


Figura 5.2.64 Comparación de velocidades en el punto 8.

5.2.9 Conclusiones

Las condiciones hidrodinámicas inducidas por marea en condiciones actuales se consideraron satisfactorias, ya que los valores de niveles y velocidades en los canales de la isla Pok-ta-pok obtenidos mediante la simulación numérica tienen correspondencia con los valores obtenidos durante las campañas de medición.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la modelación numérica, la laguna de Bojórquez actualmente cuenta con una dinámica inducida por marea muy pobre, y un tiempo de residencia teórico de 108 días. Sin embargo, este tiempo es mayor en la zona norte de la laguna, donde el movimiento de la masa de agua inducido por marea es casi nulo.

Para el primer escenario de solución, el cual consistió en conectar la laguna de Bojórquez con el Mar Caribe mediante un canal de sección rectangular de 2.5 m de profundidad (con respecto al Nivel Medio del Mar) y 6.0 m de ancho, la hidrodinámica de la laguna de Bojórquez mejoró significativamente sobre todo en la parte norte y central de la laguna. El intercambio de agua con la laguna de Nichupté se mantuvo casi del mismo orden de magnitud que para condiciones actuales. El tiempo de residencia teórico calculado para este escenario fue de 54 días.

Para el segundo escenario de simulación, considerando la misma profundidad del y trazo del canal, pero con un ancho de 10.0 m, las velocidades desarrolladas mareas muertas fueron del orden que las velocidades desarrolladas durante mareas vivas con el canal de 6.0 m de ancho, y el intercambio de masa de agua entre las lagunas de Nichupté y Bojórquez aumentó. Con este escenario de simulación el tiempo de residencia se redujo a 34 días y la dinámica en toda la laguna de Bojórquez es mayor.

La apertura del canal de comunicación de 2.5 m de profundidad y 10.0 m de ancho, entre la laguna de Bojórquez con el mar Caribe, es una buena opción para el mejoramiento de la hidrodinámica del sistema. Tanto la hidrodinámica como los tiempos de residencia mejoran significativamente. Sin embargo, es necesario realizar más simulaciones con el fin de identificar la zona de influencia de la pluma de la masa de agua que saldrá por la laguna de Bojórquez.

Referencias

- Carbajal P. N. 2009. Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, AC. SNIBCONABIO proyecto No. CQ063. México D. F.
- General bathymetric chart of the oceans, GEBCO. (2009).
http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/
- Egbert, Gary D., Svetlana Y. Erofeeva, 2002: Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 19, 183–204.
- Howes B.L., E.M. Eichner, S.W. Kelley, J. S. Ramsey, R.I. Samimy, D.R. Schlezinger (2007). Linked Watershed-Embayment Model to Determine Critical Nitrogen Loading Thresholds for the Little Namskaket Marsh Estuarine System, Orleans, MA. SMAST/DEP Massachusetts Estuaries Project, Massachusetts Department of Environmental Protection. Boston, MA.
- Kessler, W., 2006. The circulation of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* (69) p. 181-217.
- Le Provost C., Genco M. L., Lyard F., Vincent P. and Canceil P. (1994). Spectroscopy of the world ocean tides from finite element hydrodynamic model. *Journal of Geophysical Research*.
- Próspero-Villan, V. (2001). Nichupté, una cloaca.
http://www.unesco.org/csi/wise/nichupte_s.html
- Secretaría de Marina (2001). *Carta náutica número S.M.922.1*.
- Westerink, J.J., Blain, C. A., Luettich, R. A. y W, Scheffner. N. (1994). *ADCIRC: An advanced three-dimensional circulation model for shelves coasts, and estuaries*. Report 2, User's manual for ADCIRC-2DDI, Department of the Army, U.S. Army corps of engineers. Washington, DC.

5.3 EVALUACIÓN DE LOS AIREADORES PROPUESTOS POR EL GOBIERNO DEL ESTADO

5.3.1 Antecedentes

El Sistema Lagunar Nichupté (SLN) se localiza en la costa noreste del estado de Quintana Roo entre los meridianos 86°50" de longitud oeste y el paralelo 21° 02" y 21° 08" de latitud norte. El SLN comprende un área aproximada de 47.5 km² y su vaso alberga aproximadamente 710 Mm³ de agua salobre con influencia marina. El SLN se encuentra permanentemente inundado, protegido del mar Caribe por una barra de arena, constituida por la Isla de Cancún, sobre la cual se construyó la zona hotelera.

El sistema lagunar de Nichupté se caracteriza por su poca profundidad, una débil comunicación interlagunar debido a la presencia de bajos intermedios y una restringida comunicación con el mar. La caracterización de las corrientes en todo el sistema ha sido establecida mediante estudios básicos de circulación (Carbajal, 2009) y hasta con simulación hidrodinámica detallada (León et al., 1993, González et. al 1996, 1997).

En ambos casos se puntualiza la influencia local de intercambio de agua con el mar por las bocas de Cancún y Nizuc, la presencia de zonas de bajos conocidos como Zeta y Norte que dividen prácticamente al sistema Nichupté desde un punto de vista hidrodinámico.

Mención especial requiere el caso de la laguna de Bojórquez, a diferencia de las otras zonas del sistema lagunar, localizada en la parte norte de Nichupte, la cual ha sufrido cambios importantes en su morfología y hábitat acuático. De acuerdo con Merino et al (1991), dicha laguna puede llegar a un estado de eutrofización si no se toman las medidas adecuadas para lograr su estabilización.

El sistema *SolarBee*®

El Gobierno del Estado de Quintana Roo por medio de la Secretaria de Ecología y Medio Ambiente instaló dos sistemas de circulación forzada *SolarBee*®, en la laguna de Bojórquez. El sitio de ubicación de los sistemas se basa en los reportes técnicos, en donde indican que la parte de la laguna de Bojórquez presenta baja circulación y aunado a los vertidos de aguas residuales, se presenta un proceso de eutrofización, por consiguiente se tienen olores desagradables para los paseantes rivereños.

5.3.2 Ubicación

Laguna de Bojórquez

La Laguna de Bojórquez forma parte del cuerpo de agua denominado Sistema Lagunar Nichupté (SLN), localizado en el Noreste de la Península de Yucatán, específicamente en la zona hotelera de Cancún en el Municipio de Benito Juárez del Estado de Quintana Roo.

La Laguna Bojórquez se ubica al extremo noreste del Sistema Lagunar Nichupté. Se localiza en las coordenadas 21° 8' 13.27" latitud norte y 86 44' 54.20" longitud oeste, tiene una longitud máxima de 2.6 km, una superficie aproximada de 240 ha y un volumen de 4.3 hm³ (IMTA 2010).

5.3.3 Delimitación Física

La Laguna de Bojórquez presenta dos canales de comunicación con la Laguna de Nichupté, el canal Norte y el canal Sur de la Isla Pok Ta Pok, en rivera se encuentra bordeada casi en su totalidad por diversos tipos de asentamientos humanos y de servicios, entre los que destacan hoteles, marinas, restaurantes, un campo de golf, una planta de tratamiento de aguas residuales (Pok-Ta-Pok), el Centro de Convenciones de Cancún, diversos establecimientos comerciales y la Isla Dorada. Dentro de la Isla Dorada se localizan una serie de pequeños canales que comunican a la Laguna de Bojórquez con Nichupté por la parte sur.

5.3.4 Sistema de aeración-circulación Solar Bee

Descripción del equipo (información obtenida del sitio comercial <http://www.solarbee.com/technology>)

El sistema SolarBee© utiliza tres paneles solares para captar energía solar y convertirla en eléctrica energía. La energía eléctrica se envía a un pequeño motor que mueve un impulsor. La rotación del impulsor induce un flujo de agua desde el fondo hacia arriba a través de un tubo flexible. El tubo se fija por debajo de la superficie del agua a una profundidad que puede ser ajustado para tener condiciones óptimas. El agua extraída de lo más profundo de la columna de agua y es llevada a la superficie donde suavemente se mezcla con el agua superficial.

La capacidad mecánica del equipo es una alimentación de tres paneles de 80 Watts a una tensión de 18 volts de CD, un controlador de carga que alimenta a una batería y esta mantiene una operación continua día y noche del motor del impulsor. El motor mueve el impulsor a 80 RPM y debido al diámetro del tubo se tiene un flujo lento número, con pocas turbulencias en la superficie de salida, el

volumen según la ficha técnica es de 10.000 GPM de flujo ascendente, y tiene una eficiencia de 0,14 km² (35 acres) de espacio.

El efecto neto de la SolarBee© es aumentar la circulación del agua. Esto se logra mediante el aumento tanto el flujo directo e inducido. Según los fabricantes, el aumento de la circulación se mejora la calidad del agua y en los procesos naturales químicos y biológicos.

Según S.M.U.P (2004) se indican las siguientes ventajas:

La estrategia básica de un equipo SolarBee© es generar un circulación para romper el crecimiento de las algas verde-azules, inducir oxígeno y reducir el estancamiento del agua. El equipo consiste en una estructura flotante que utiliza paneles solares para alimentar a un motor de ½ Hp de corriente directa, con el que se acciona un impulsor localizado en un tubo circular de succión (el cual es mayor de 0.91 m) y la descarga del tubo se realiza de manera suave, con lo cual se induce un volumen de circulación. El tubo de succión puede ajustarse para niveles de 0.3 a 30 metros.

El agua que es vertida al final de la succión se dispersa de manera radial y suave, con esta forma de descarga consideran que se llega a tener un flujo laminar y genera un movimiento en una escala longitudinal grande. Es un hecho, por increíble que parezca, la pruebas independientes reportan que el SolarBee© es capaz de mover el agua hasta una longitud de 300 m (haciendo uso de un motor de ½ Hp con una energía disponible de 80 Watts.

Las ventajas de funcionamiento de los equipos se presentan en las referencias de Knud-Hansen 2009 y 2011, y EcoLogic, 2007.

5.3.5 Aplicación de los equipos SolarBee©

Según los reportes de los fabricantes y los usuarios se han instalado SolarBee© en los Estados Unidos de América en más de 300 sitios, en cuerpos de agua con una gran diversidad de profundidades, extensión y volumen. En forma similar se tienen reportadas instalaciones en muchas partes del mundo, así como en México (Laguna de Cd. Guzmán, Jalisco y Laguna de Bojórquez, Quintana Roo).

Una de los principales reportes de la aplicación del sistema SolarBee© (Hudnell, 2010) indica la capacidad que tiene en la disminución de los Afloramientos de

Algas Nocivas en Agua Dulce (FHAB)¹. En la publicación de Hudnell (2010) presenta la capacidad de los SolarBee© para la supresión de las FHAB, y describe los resultados en tres estudios, en los cuales las compañías de agua municipales recogieron datos de medición limnológicos antes y durante la implementación de los SolarBee©.

Los casos presentados Hudnell (2010) son Lago Crystal en Iowa, Lago East Gravel en Colorado y Lago Palmdale en California, el tamaño de los sitios varían entre 0.26 a 0.89 km² (26 a 89 Ha) y con profundidades de 7.6 a 10.7 m con volúmenes de 0.765 Mm³ a 4.9 Mm³, muestra resultados en los FHAB, con datos medidos por los operarios municipales.

No obstante Hudnell (2010) indica lo siguiente, los equipos SolarBee© no tuvieron éxito en pequeños estanques de acuicultura con profundidades de 1 m y volumen de 1000 m³, el motivo dice que es desconocido. Fallas similares se han tenido en pequeños estanques con profundidades menores a 1 m, especialmente aquellas cuando se tienen humedales que ayudan a mantener un respaldo de las FHAB. De igual forma no logra la disminución de los FHAB cuando se tiene el aporte del río, también cuando se tienen tiempos de residencia pequeños del orden de 5 días y más aún combinado con un nivel del embalse pequeño. También en el mismo reporte de Hudnell (2010) indica que se tiene un caso en donde se aplicó un equipo a una bahía de 7.2 km² dentro de un lago extenso y no se tuvo éxito, pero no indica la causa de la falla.

En las conclusiones de este mismo trabajo de Hudnell (2010) se indica que el equipo SolarBee© contribuye a la eliminación de las FHAB y está se logra para una capacidad de 0.15 km² por unidad y la toma del equipo debe inducir una circulación a larga distancia desde el epilimnion. Finalmente **indica que la capacidad que tiene el SolarBee© para eliminar la FHAB aún no se conoce**, pero presupone que es un método eficaz para la eliminación de la FHAB.

La evidencia de aplicaciones similares del equipo SolarBee© de éxito se muestran en la página del fabricante y en las referencias Bleth 2001, Belhateche 2006, Hudnell 2010, Knud-Hansen 2009, 2010, 2011, Stewart 2009 y SUMD 2004.

5.3.6 Estudio de evaluación de los equipos Solar

Los estudio de evaluación de los equipos SolarBee© se dividen en forma controversial entre dos extremos, los que consideran que son la solución para los

¹ FHAB siglas en inglés de *Freshwater harmful algal bloom*, y los organismos predominantes en los FHAB son las Cianobacterias (algas verde-azules).

problemas de control de los malos olores y deterioro de la calidad del agua y los investigadores que han realizado estudio en detalle con evidencia detractora en su aplicación (Barkoh, 2011, EcoLogic, 2007, Elam, 2008, Ginkel 2011, Jorgensen 2005, Slagowski, 2009) incluso Hudnell (2010) indica que bondad de estos equipos depende de las condiciones de aplicación.

Presa Falling Creek, EUA (Elam, 2008)

Uno de los trabajos más extensos en la evaluación de un equipo SolarBee© fue realizado por Elam (2008). El equipo SolarBee© fue en el almacenamiento Falling Creek, debido a que este embalse se caracteriza por problemas de olores y presencia de FHAB, el equipo fue instalado en mayo de 2007 y el periodo de prueba fue en la primavera del 2008. En la prueba se midieron parámetros de OD, temperatura y conductividad con perfiles obtenidos en la vertical, también se midieron corrientes con un perfiladores acústico ADCP². Los conclusiones de Elam (2008) indican que de la observación de los perfiles de velocidad y oxígeno disuelto el proceso de mezcla en el embalse Falling Creek se origino por el viento y el equipo SolarBee©. El equipo de bombeo del SolarBee© produjo una mayor mezcla a la prevista para una distancia no mayor a 10 metros del equipo, entonces tuvieron influencia en la temperatura para una distancia de 6 metros y en el campo fotosintético para una distancia un poco mayor a 10m.

Presa Rietvlei, Sudáfrica (Ginkel, 2011)

En la presa Rietvli instalaron 16 sistemas SolarBee© seis en julio de 2009 y diez en 2009, y se reporta que estos sistema no logran el completo mezclado de la termoclina. No obstante la Ciudad de Tswane continúa monitoreando para evaluar la efectividad de los equipos y el organismo está financiando un proyecto para buscar el desarrollo de un modelo de predicción, en el cual se pruebe sobre el embalse Rietvlei.

Aplicación en pequeños estanques de acuacultura (Barkoh, 2011)

El estudio consistió en aplicación del SolarBee© en seis estanques 0.4 ha en una granja piscícola en el condado de Archer, Texas, en donde se tenía conocimiento histórico de aparición de FHAB con la especie *P. parvum*. La prueba consistió en utilizar en tres estanques un SolarBee© y dejar tres estanques como prueba testigo. El resultado de la prueba indicó que para el caso de estos estanques el sistema SolarBee© no controló el crecimiento de la microalga y el autor Berkoh (2011) indica que el sistema no es eficaz en alterar ningún factor ecológico, que limite a esta microalga dominar el estanque, ante otros competidores y concluye que este sistema es no efectivo para control de esta FHAB.

Lago Cochituate, Massachusetts (Slagowski, 2009)

² ADCP ,acoustic doppler current profiler, siglas en inglés de perfilador acústico de efecto doppler.

En el lago Cochitautte tienen la presencia de la invasión de macrófita acuática sumergida (*Myriophyllum spicatum*). Con el fin de ayudar en el manejo de esta planta se instalaron SolarBee©, en lugar de aplicar la técnicas convencionales mecánica, químicas o biológicas. El motivo de utilizar estos sistemas fue por la gran cantidad de evidencia “anecdótica” (Slagowski, 2009) en donde indican que tienen gran capacidad en reducir el crecimiento de esta macrófita.

En el lago Cochitautte se instalaron dos SolarBee© entre octubre de 2006 a octubre de 2008 y se realizaron mediciones de parámetros físicos y químicos en la columna de agua y el sedimento, así como en la densidad de la *Myriophyllum sp.* (Parámetros medidos: temperatura, pH, conductividad, OD, fósforo total, amonio, nitrato y nitrito, fierro total disuelto, SSP, turbiedad y alcalinidad, la velocidad del agua se midió con un ADV³ FlowTracker Sontek©).

El autor Slagowski (2009) que el resultado de este estudio indica que no hubo cambio en la abundancia y distribución de la *Myriophyllum sp.*, en las áreas analizadas sobre todo el curso de la investigación. Indica que se detectaron cambio estacionales en el crecimiento de la macrófita no era evidente que fueran provocados por la presencia de los equipos SolarBee©. Asimismo cambios en los niveles de amonio y nitratos no son influenciados por los equipos.

Como conclusión Slagowski (2009) indica que los sistema SolarBee© han sido aplicados en muchos lagos de América del Norte, en muchos caso se tiene una evidencia anecdótica de que la acción de las bombas de circulación vertical ha llegado a la reducción en el crecimiento de la *Myriophyllum sp.* Hasta la fecha ningún estudio ha informado sobre las razones por la que el sistema SolarBee© aplicado a un lago puede afectar su crecimiento y porque en otros no afecta. Los resultados del estudio en el Lago Cochihuate indican que después de dos años de uso de los SolarBee©, no hubo ningún cambio en la abundancia y distribución de la *Myriophyllum sp.* El análisis de la información indica que los sedimentos anóxicos, donde la transferencia de oxígeno a la columna de agua es limitada por la difusión y es consumido rápidamente por la reacciones bio-químicas, tienen a prosperar a pesar de la acción de las bombas circulación de flujo ascendente SolarBee©.

Lago Conesus (EcoLogic y Bosch, 2007)

El consejo de cuenca del Lago Conesus, Condado de Livingston, estado de Nueva York (Conesus Lake Watershed Council) estuvo de acuerdo en implementar un estudio piloto para la evaluar unidades SolarBee©, durante la temporal recreacional de 2006 y 2007. El lago Conesus presenta una degradación en la calidad del agua. La carga y concentración de fósforo es alta en el lago y alberga abundantemente macrófitas, phytoplankton y FHBA. Conteos elevados de bacterias

³ ADV, Acoustic Doppler Velocimeter, siglas en inglés de velocímetro acústico Doppler

plumas visibles de sedimentos, incrementos en las concentraciones de cloruro y proliferación de especies exóticas son efectos de deterioro en la ecología del lago y en el uso recreativo. Con el fin de mejorar la calidad del lago Conesus, así como evaluar su efectividad, se instalaron tres equipos SolarBee®, cerca de las orillas.

Ecologic (2007) indica que la prueba piloto en lago Conesus fue diseñada para probar hipótesis específicas relacionadas, con las afirmaciones del fabricante de la calidad del agua y las condiciones presentadas, que son mejoras por las máquinas SolarBee® en el lago Conesus. Las interpretaciones y conclusiones son específicas para Lago Conesus y no puede ser aplicable a otros lagos.

La prueba piloto de las unidades SolarBee® en el lago Conesus, para comprobar las hipótesis que dice el fabricante que sistema ayuda para mejorar la calidad del agua. Los resultado de la prueba indican que los SolarBee® no son efectivos significativamente en el mejoramiento de la calidad o que afecten del desarrollo de la macrófita, en los sitios donde fueron instalados. En forma general los sistemas SolarBee®

5.3.7 Medición de corrientes en la laguna de Bojórquez (IMTA, 2011)

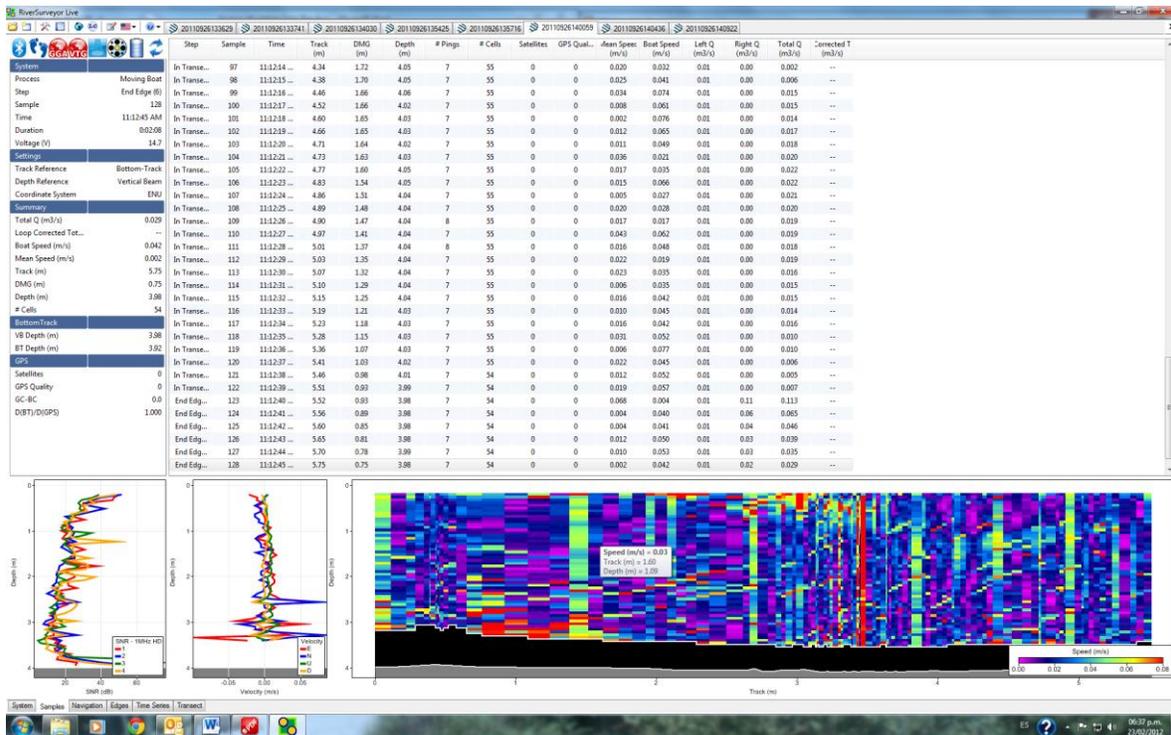
Durante la campaña de medición en la laguna de Bojórquez en el mes de septiembre de 2011, se realizó una medición de corrientes en el campo cercano del equipo SolarBee®. Estas mediciones se realizaron a 1, 5, 10 y 15 metros del equipo con un equipo de ADCP multifrecuencia M9 marca Sontek y se tomaron muestreos de dos minutos.

Los resultados de los perfiles de velocidad para un 1, 10 y 15 se muestran en las figuras 1, 2 y 3, respectivamente. En la figura 1 con el muestreo a un metro se observa la influencia del motor de impulsión vertical con una corriente de aproximadamente 4 cm/s. En las figuras 2 y 3, lo que corresponde a valores de 10 y 15 m de distancia desde el equipo SolarBee®, y no se observa un patrón de velocidades predominante.

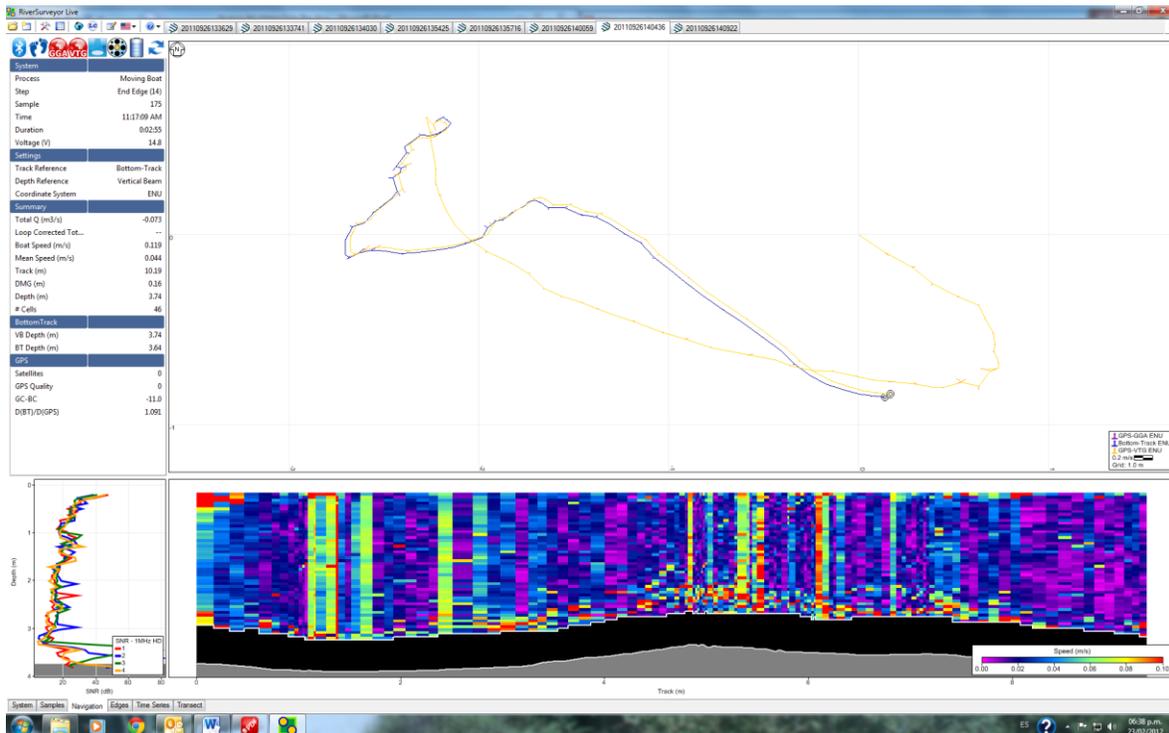
5. Supervisión de acciones y desarrollo de herramienta de soporte para generación de escenarios de restauración ecológica.



Perfiles de velocidad del agua a 1 metro de la descarga del equipo SolarBee© (se observa la descarga del flujo sobre la superficie).



Perfiles de velocidad del agua a 10 metros del SolarBee©



Perfiles de velocidad del agua a 15 metros del SolarBee©

La evaluación realizada por Slagowski (2009) realiza una evaluación de corrientes en el campo cercano del equipo, utilizando equipos de perfilación acústica, y obtiene que estos equipos, no tienen influencia para distancias mayores a 15 metros.

De la evidencia de las mediciones realizadas por IMTA (2011) y las presentadas por Slagowski (2009) se puede concluir que los efectos de un equipo de baja potencia, no son de consideración en un sistema lagunar en donde se tiene una entrada de marea y viento, estas forzantes son de mucho mayor magnitud que un motor trabajando con 80 Watts de potencia.

5.3.8 Conclusiones

Los equipos de circulación forzada SolarBee© muestran dos escenarios para tomarse en cuenta, a) cuando todos los documentos elaborados por la empresa fabricante, ya sea en forma directa o en colaboración con la entidad encargada de manejar el cuerpo de agua por sanearse, indican que estos equipos son un

solución inobjetable, aunque Hudnell (2010) menciona que para ciertas condiciones los equipos SolarBee®, no tendrán una operación que ayude a mejorar el manejo de las FHAB.

Por otra parte todas las referencias bibliográfica encontradas, que no tienen relación con la empresa fabricante, aunque son entidades o instituciones que han adquirido uno o varios equipos SolarBee®, no indican que la capacidad descrita por el fabricante cumpla con lo indicado en la publicidad.

Por lo tanto, no es posible saber con un detalle determinístico si la instalación de 2, 17 o más sistemas serán suficientes para reducir significativamente los malos olores en la laguna de Bojórquez (el valor de 17 equipos se determinó con la recomendación de instalación por área de influencia propuesta por el fabricante que es de 0.14 km²/equipo). Esto se refuerza con lo comentado por el mismo consultor de la empresa (Hudnell, 2010) en donde **indica que la capacidad que tiene el SolarBee® para eliminar la FHAB aún no se conoce**, pero la evidencia indica que esta capacidad de eliminación no es segura y varía su eficacia de un cuerpo lagunar a otro.

Inexorablemente, para medir la eficacia en la eliminación de los olores de los equipos SolarBee® instalados en la laguna de Bojórquez, se debe realizar estudio completo en donde se pueda demostrar que el mover el flujo del fondo hacia la superficie con una descarga suave, es un método de limitación de FHAB. Además en este estudio se deben identificar y medir todas las variables exógenas que tienen influencia en el movimiento de la laguna, por ejemplo: la marea, viento, y corrientes de densidad. Los resultados de la evaluación deben incluir los efectos del corte de nutrientes que se está realizando, con la mejora del sistema de drenaje de la zona hotelera, acciones que se están ejecutando desde el 2011, como parte de la primera etapa de la proyecto de Restauración Ecológica de la Laguna de Bojórquez.

Referencias

- Barkoh A., Begley D. C., Smith D. G., Kurten G. L., Fries L. L. y Schlechte J. W. 2011. Can solar powered circulation control *Prymnesium parvum* blooms and toxicity in fish hatchery ponds?, *Harmful Algae* 10(2011) 173-180.
- Carbajal P. N. 2009. Hidrodinámica y transporte de contaminantes y sedimentos en el Sistema Lagunar de Nichupté-Bojórquez, Quintana Roo. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, AC. SNIBCONABIO proyecto No. CQ063. México D. F.
- EcoLogic, LLC y Bosch I. 2007. Report: Conesus Lake SolarBee Pilot Test 2007 Monitoring Program Results, NY.

- Elam, K. P. 2008. *Effects of a Surface Circulator on Temperature, Dissolved Oxygen, Water Velocity, and Photosynthetic Yield in Falling Creek Reservoir*, Master of Science In Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, VA, EUA.
- Ginkel C. V. 2011. Eutrophication: Present reality and future challenges for South Africa, *Water SA* Vol. 37 No. 5 WRC 40-Year Celebration Special Edition 2011.
- González J. A., M. G. Mejía, L. R. Puente, J. I. Robles, M. E. Escalante, P. V. Echeverría, M. O. Meza y A. M. Muñoz. 1996. *Construcción del sistema de aireación de la Laguna de Bojórquez, Cancún Quintana Roo*, Informe final del proyecto HC-9621. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- González J. A, L. R. Puente, J. I. Robles y A. Banderas-Tarabay. 1997. *Evaluación y seguimiento del impacto del sistema de aireación de la Laguna de Bojórquez*. Informe final del proyecto HC-9726. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México.
- Hudnell H. K., Jones C., Labisi B., Vic L., Hill D. R. y Eilers J. 2010. Freshwater harmful algal bloom (FHAB) suppression with solar powered circulation (SPC), *Harmful Algae* 9(2010) 208-217.
- Jorgensen E., 2005. Feasibility of Membrane Concentrate Disposal (using enhanced evaporation systems), AMTA, FI.
- León, L., M. Escalante, J. A. González. 1993. *Hidrodinámica en la laguna de Nichupté*. Informe final del proyecto SH-9306. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México. 70 pp.
- Merino S., E. Czitrom, E. Jordan, E. Martin, P. Thome y O. Moreno. 1990. Hydrology and rain flusing of the Nichupté lagoon system. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. Academic Press, 30: 223-237.
- Slagowski N., Mann-Stadt M. y Durant J. L.. 2009. Report: *Use of Upflow Water Circulators for Managing Eurasian Watermilfoil in Lake Cochituate (eastern Massachusetts)*, Department of Civil & Environmental Engineering, Tufts University, Medford, MA.

Referencias relacionadas con la empresa SolarBee©

- Bleth J. 2001. Active, continuous mixing improves sampling accuracy and maintains potable water quality in storage tanks, *Circulation Topics* #101, [Solar Bee Inc.](#)
- Belhateche D., Turco M., Wang Y. y Bleth J. 2006. Case Study: TX-120: Solar-powered Circulators Improve Lake Houston Water Quality, [Solar Bee Inc.](#), Tx.
- Hudnell H K., Green D., Vien R., Butler S., Rahe G., Richards B. A y Bleth J. 2010. *White Paper: Improving Wastewater Mixing and Oxygenation Efficiency*, [Solar Bee Inc.](#)
- Knud-Hansen C. F. 2009. Memorandum: *Destratification in comparison to using SolarBees for lake management*. [Solar Bee Inc.](#)
- Knud-Hansen C. F. 2010. White Paper: *SolarBee Experience in Inhibiting Submersed Macrophyte Growth*. [Solar Bee Inc.](#)

-
- Knud-Hansen C. F. 2011. Memorandum: *Field Evaluation of SolarBees in Freshwater*. Solar Bee Inc.
- Stewart E., Williams K. F. y Tanner S. 2009. *Mapping and Characterizing Aquatic Macrophytes at Blue Lake, Multnomah County*. Poster at Annual meeting Oregon Lakes Association.
- SUMD. 2004. *Energy efficiency & customer research & development, technology brief ... The Solar Bee*. Sacramento Municipal Utility District. Solar Bee Inc.

Resumen de aplicación del sistema SolarBee®

Sitio de aplicación	Referencia	Comentarios de la aplicación
Presas Falling Creek, NY	Elam, K. P. 2008. <i>Effects of a Surface Circulator on Temperature, Dissolved Oxygen, Water Velocity, and Photosynthetic Yield in Falling Creek Reservoir</i> , Master of Science In Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, VA, EUA.	El sistema sólo tuvo influencia en la temperatura, corriente y campo fotosintético, <u>a una distancia no mayor de 10m</u> , aunque para ciertas condiciones de clima, se obtuvieron influencias a una distancia mayor ⁴ .
Presas Rietvlei, Sudáfrica	Ginkel C. V. 2011. Eutrophication: Present reality and future challenges for South Africa, <i>Water SA</i> Vol. 37 No. 5 WRC 40-Year Celebration Special Edition 2011.	En la presa Rietvli se instalaron 16 sistemas SolarBee® seis en julio de 2009 y diez en 2010. Se reporta que <u>estos sistemas no logran el completo mezclado</u> de la termoclina.
Aplicación en pequeños estanques de acuicultura. TX	Barkoh A. , Begley D. C., Smith D. G., Kurten G. L., Fries L. L. y Schlechte J. W. 2011. Can solar powered circulation control <i>Prymnesium parvum</i> blooms and toxicity in fish hatchery ponds?, <i>Harmful Algae</i> 10(2011) 173-180.	La prueba indicó que, para el caso de estos estanques el sistema SolarBee® <u>no controló el crecimiento de la microalga</u> e indica que el sistema no es eficaz en alterar ningún factor ecológico que afecten a esta microalga y concluye que este sistema no es efectivo para el control de la cianobacteria <i>Prymnesium parvum</i> .
Lago Cochituate, Massachusetts	Slagowski N., Mann-Stadt M. y Durant J. L.. 2009. Report: <i>Use of Upflow Water Circulators for Managing Eurasian Watermilfoil in Lake Cochituate (eastern Massachusetts)</i> , Department of Civil & Environmental Engineering, Tufts University, Medford, MA.	Los resultados del estudio indican que después de dos años de uso de los SolarBee®, no hubo ningún cambio en la abundancia y distribución de la <i>Myriophyllum sp.</i> El análisis de la información indica que los sedimentos anóxicos, donde la transferencia de oxígeno a la columna de agua es limitada por la difusión y es consumido rápidamente por la reacciones bio-químicas, tienen a prosperar a pesar de la acción de las bombas circulación de flujo ascendente SolarBee®.
Lago Conesus	EcoLogic, LLC y Bosch I. 2007. Report: Conesus Lake SolarBee Pilot Test 2007 Monitoring Program Results, NY.	Se realizó una prueba de unidades SolarBee® en el lago Conesus, para comprobar la eficacia del equipo en la mejora de la calidad del agua. Los resultados de la prueba indican que los SolarBee® <u>no son efectivos significativamente</u> en el mejoramiento de la calidad del agua o que afecten el desarrollo de las macrofitas, en los sitios donde fueron instalados.

Nota: En la bibliografía consultada, que no fuera del fabricante, no se encontró ningún caso de éxito. Incluso en el artículo de referencia principal científica del fabricante (Hudnell, 2010) indica: “*la capacidad que tiene el SolarBee® para eliminar las Cianobacterias aún no se conoce, pero la evidencia indica que es un método eficaz para la eliminación*” pero esta evidencia no la presenta más que con estudios cualitativos. En esta

⁴ En el estudio de medición de corrientes en la Laguna de Bojórquez realizado por el IMTA en 2011, se midieron los patrones de flujo de un SolarBee® y se determinaron que las velocidades de recirculación en fondo y superficie no son perceptibles a una distancia mayor de 15 m del sistema.

revisión no se encontró ningún caso de aplicación o evaluación de este equipo para una laguna costera de agua salada, condición de similitud con la laguna de Bojórquez.

**RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE LA LAGUNA DE BOJÓRQUEZ,
BENITO JUÁREZ, QUINTANA ROO.
Proyectos Ramo 16, para el 2011**

**5. Supervisión de acciones y desarrollo de herramienta de soporte
para generación de escenarios de restauración ecológica.**

Informe Final

Actividades

- 1 Identificar los orígenes de las descargas clandestinas y proponer e implementar su solución.**
 - 2 Diagnóstico de operación y eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales Pok Ta Pok.**
 - 3 Complementar acciones para incrementar y hacer más eficiente la cosecha de algas en zonas altamente eutrofizadas.**
- 5.2 supervisión de acciones y desarrollo de herramienta de soporte para generación de escenarios de restauración ecológica.**

CLAVE IMTA: HC-1110.2

COORDINACION DE HIDRÁULICA
SUBCOORDINACIÓN DE HIDRÁULICA AMBIENTAL
SUBCOORDINACIÓN DE HIDRÁULICA URBANA

Participantes:
Ariosto Aguilar Chávez
Jorge Armando Laurel Castillo
Víctor Guillermo Mejía Astudillo
Rubén Antelmo Morales Pérez

Marzo 2012

**RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE LA LAGUNA DE BOJÓRQUEZ,
BENITO JUÁREZ, QUINTANA ROO.
Proyectos Ramo 16, para el 2011**

**5. Supervisión de acciones y desarrollo de herramienta de soporte para
generación de escenarios de restauración ecológica**

Informe Final

- 1 Identificar los orígenes de las descargas clandestinas y proponer e implementar su solución.**
- 2 Diagnóstico de operación y eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales Pok Ta Pok.**
- 3 Complementar acciones para incrementar y hacer más eficiente la cosecha de algas en zonas altamente eutrofizadas.**

CLAVE IMTA: HC-1110.2

COORDINACION DE HIDRÁULICA
SUBCOORDINACIÓN DE HIDRÁULICA AMBIENTAL
SUBCOORDINACIÓN DE HIDRÁULICA URBANA

Participantes:
Ariosto Aguilar Chávez
Jorge Armando Laurel Castillo
Víctor Guillermo Mejía Astudillo
Rubén Antelmo Morales Pérez

Marzo 2012

1 Identificar los orígenes de las descargas clandestinas y proponer e implementar su solución.

Resumen

Con la finalidad de mejorar la calidad del agua de la laguna de Bojórquez este proyecto propone un censo y ubicación de las descargas clandestinas que se encuentran en la periferia de la laguna de Bojórquez así como la medición de sus caudales. Para esto se llevaran a cabo monitoreos de 24 horas sobre la periferia para ubicar las descargas, registrar horario de descarga así como tiempos de descarga y época. A las descargas que aparezcan de manera constante independientemente la época del año y que presenten caudales importantes se les realizará un análisis de parámetros físicos químicos y microbiológicos para conocer su naturaleza.

Antecedentes

Desde la creación de Cancún como Polo Turístico, la Laguna de Bojórquez, ha sido fuertemente impactada. De acuerdo con la literatura en sus orígenes la laguna contaba con alrededor de 1 m de profundidad (Merino y Gallegos, 1986), actualmente llega hasta 3 o 4 m de acuerdo con el estudio batimétrico realizado en este estudio. Además del dragado y con fines de infraestructura, la laguna fue rellenada en algunas zonas y el paso que permitía el intercambio de agua con el mar fue cerrado.

Cabe destacar que la zona hotelera descansa sobre un sistema de alcantarillado de asbesto que desde hace 40 años no ha sido sustituido. El cual manifiesta la presión de la demanda de servicios a través de las múltiples fisuras, fugas y tramos colapsados que se han registrado.

En un estudio realizado por el IMTA en el año 2010 se identificaron 10 descargas clandestinas de agua residual conectadas, algunas de ellas, al sistema pluvial. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que este número sea mayor, es por ello que se recomienda un monitoreo periódico tanto de día como de noche en la periferia de la laguna a fin de identificar nuevas descargas. Derivado del monitoreo de calidad de agua se encontró que la laguna presenta alta concentración de nutrientes en su forma de nitritos y nitratos, altas concentraciones de detergentes así como baja concentración de oxígeno disuelto. La problemática de la Laguna de Bojórquez se resume en un problema por un lado de infraestructura, porque es claro que el sistema de alcantarillado diseñado y proyectado hace 40 años ya fue rebasado y por otro, la entrada de nutrientes a la laguna mediante las descargas de aguas negras.

Cabe mencionar que la entrada de nutrientes se realiza a través del vertido directo de aguas residuales, de forma indirecta mediante las fugas, fisuras y tramos colapsados de la red de alcantarillado y posiblemente mediante las descargas de agua residual tratada a través de los pozos de infiltración. Aunque el estudio realizado por el IMTA contabiliza 10 descargas clandestinas cabe hacer mención que estas descargas fueron localizadas en dos épocas (junio y septiembre) del año, en donde el muestreo fue realizado durante el día, por lo que es muy probable que durante la noche aumente este número, o bien aumente el caudal de vertido de aquellas georeferenciadas. Este mismo comportamiento debe muy probablemente seguir un patrón estacional inherentes a las propias actividades productivas del sector, es decir, en verano la cantidad de aguas residuales generadas es mayor y si la capacidad de la red de alcantarillado no es suficiente para hacer frente a esta sobre demanda, es de esperarse que se localice un mayor número de descargas o bien un mayor caudal vertido hacia la Laguna. Es importante destacar que de los 148 hoteles de Cancún el 90% aproximadamente se concentra en la zona hotelera y el 10% restante se ubican en la zona urbana, es decir, alrededor de 130 hoteles están concentrados en la periferia del Sistema Lagunar de Nichupté. Tan sólo en los márgenes de la Laguna de Bojórquez se ubica el 30% de hoteles del total de la zona hotelera con una capacidad de 7789 cuartos que representan el 26% de la oferta total. Debido a lo anterior, la laguna de Bojórquez es un cuerpo de agua con un alto grado de vulnerabilidad a la contaminación de sus aguas a causa de las actividades antropogénicas que en sus márgenes y en su interior se llevan a cabo trayendo como consecuencias la fragmentación, modificación y en el peor escenario destrucción de los hábitats naturales que sirven de sustento para muchas especies entre los que figuran los seres humanos.

Justificación

Mediante el estudio realizado por el IMTA pudo ponerse en evidencia la existencia de al menos 10 descargas clandestinas de agua residual a la laguna, sin embargo, se desconoce a ciencia cierta si son las únicas o bien si existen más descargas. En un estudio realizado por el INE en 1992 se reportan 18 descargas clandestinas de las cuales se clausuraron 5. Muchas de las descargas de aquella época coinciden con las encontradas en el estudio realizado por el IMTA. Debido a que las descargas de agua residual aportan nutrientes y éstos a su vez generan problemas de eutrofización en los cuerpos de agua es necesario desarrollar un estudio formal que sirva de referencia para la toma de decisiones. Mediante este estudio será posible contabilizar el número de descargas de agua residual que están vertiéndose a la laguna así como conocer su gasto y caracterización fisicoquímica y microbiológica.

Objetivo General:

Contar con un documento formal (censo) que cuantifique y caracterice las descargas clandestinas de aguas residuales hacia la laguna de Bojórquez

Objetivos particulares:

1) Contabilizar las descargas clandestinas de aguas residuales hacia la laguna

5. Supervisión de acciones y desarrollo de herramienta de soporte para generación de escenarios de restauración ecológica.



- 2) Georeferenciar las descargas clandestinas de aguas residuales hacia la laguna
- 3) Determinar el caudal de cada descarga clandestina de aguas residuales que sea vertida hacia la laguna
- 4) Caracterizar las descargas clandestinas de aguas residuales de mayor importancia en base al caudal vertido y grado de continuidad del vertido.

Costo de la actividad “Identificar los orígenes de las descargas clandestinas y proponer e implementar su solución” \$940,509.63 (novecientos cuarenta mil quinientos nueve pesos 63/100 M.N.), IVA incluido.

Principales resultados obtenidos

5. Supervisión de acciones y desarrollo de herramienta de soporte para generación de escenarios de restauración ecológica.



2 Diagnóstico de operación y eficiencia de la planta de tratamiento de aguas residuales Pok Ta Pok.

Actividad no realizada

3 Complementar acciones para incrementar y hacer más eficiente la cosecha de algas en zonas altamente eutrofizadas.

Para procurar mayor disponibilidad de oxígeno disuelto en el agua y evitar los malos olores es indispensable retirar las colonias de algas que proliferan en las zonas de mayor descarga de aguas pluviales. Así mismo, es importante retirar la vegetación que incrementa la sedimentación y deteriora el valor paisajístico de la Laguna.

Debido al alto aporte y contenido de nitratos al cuerpo lagunar se estimula el crecimiento de algas, mismas que pueden causar problemas de calidad de agua asociados con eutrofización. La subsiguiente muerte y descomposición de algas produce efectos secundarios en la calidad del agua, los cuales pueden también ser indeseables.

Ante ello se propone proceder con la Cosecha de algas las cuales al bajar el nivel del agua de la laguna, tienden a la desecación, proceso producido por la alta exposición al sol y que provoca que inicie el proceso de descomposición y con ello la generación de malos olores y también se produce la imagen negativa por el acumulamiento y proliferación de las algas marinas. Ésta situación se presenta en las zonas de “bajos” y en la zona marginales de la laguna.

La cosecha de algas se ejecuta de manera manual, retirando las algas marinas flotantes y/o acumuladas en las orillas que se encuentren en el perímetro de la Laguna Bojórquez para lo cual se utiliza una lancha de fibra de vidrio motorizada para trasladarse a los sitios lejanos, una lancha de fibra de vidrio sin motor para recolectar en las orillas y una canoa de aluminio para las zonas muy bajas. El procedimiento consiste en recolectar manualmente las algas mencionadas, utilizando bieldos y escobillas, acumulando el producto en las lanchas, para ser transportadas al centro de acopio ya establecido.

El producto de la recolección de las algas marinas ya acumulado en el lugar de acopio es cargado a mano, utilizando bieldos, a un camión volteo de 7 m³ con el cual se realiza el retiro, acarreo y descarga hasta su destino final ubicado en las instalaciones de la planta de composta que opera FONATUR Mantenimiento en la zona.

Se plantea realizar la cosecha de algas una vez por semana por un período de dos meses que complementario con la disminución del aporte de nutrientes a la laguna evitará el posterior crecimiento de cualquier colonia de algas.

Costo de la actividad “Complementar acciones para incrementar y hacer más eficiente la cosecha de algas en zonas altamente eutrofizadas” \$477,300.00 (cuatrocientos setenta y siete mil trescientos pesos 00/100 M.N.), IVA incluido.

Principales resultados obtenidos

Se realizaron ocho colectas entre los meses de noviembre a diciembre de 2011, con un volumen seco de extracción de 69.5 m³.

Para el caso de la temperatura se tuvo registro de 24.0 oC parecida al de años anteriores, la salinidad promedio que se registró durante el muestreo fue de 32 UPS, valor que se mantiene desde los primeros registros de estudios en la laguna.

Los valores de registros de temperatura, salinidad y turbidez indicaron que se han mantenido en un nivel que no permite el crecimiento exponencial de las algas filamentosas flotantes. Sin embargo el escaso crecimiento que se dio fue retirado con los trabajos realizados logrando que alrededor del 95 de la superficie de la Laguna se encuentre libre de algas, condición que evitó la producción de gases y generación de malos olores.

La falta de cultura social genera que aun se observen muchos residuos sólidos en el borde lagunar, lo cual es una fuente importante de contaminación visual y ambiental.