



Administración
Portuaria Integral de
Manzanillo, S.A. de C.V.



INFORME FINAL

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

ADMINISTRACIÓN PORTUARIA INTEGRAL S.A. DE C.V.

CONVENIO **API-MAN-CON-10-09**

COORDINACION DE HIDRÁULICA

SUBCOORDINACIÓN DE HIDRÁULICA AMBIENTAL

CLAVE IMTA: HC-0920.3

Jefe de proyecto: Rubén A. Morales Pérez

Participantes:

Ariosto Aguilar Chávez

Jorge Armando Laurel Castillo

Héctor S. Vélez Muñoz

Víctor Mejía Astudillo

Daniela Hernández Meza

Mayo 2009



RESUMEN

Como parte de la rehabilitación de la laguna de Las Garzas y de la ampliación del puerto de Manzanillo, se llevo a cabo la modelación hidrodinámica de la condición actual del puerto y de la condición de proyecto, con la laguna de las garzas comunicada a la dársena. En zonas costeras el principal mecanismo de forzamiento es la marea, por lo tanto, para el estudio sólo se considero el forzamiento de la marea. Para establecer cuantitativamente las corrientes inducidas por la marea, se llevo a cabo una campaña de medición de corrientes al interior del puerto. Los resultados de las mediciones permiten establecer las condiciones ambientales que prevalecen al interior del puerto y asimismo, verificar y ajustar los resultados de las simulaciones numéricas bajo condiciones actuales. Finalmente, para la condición de proyecto se establece la circulación e intercambio de masa de agua entre la laguna de Las Garzas y la dársena. Para esto se llevaron a cabo simulaciones de la dispersión y mezcla de la salinidad en la condición de apertura de la laguna de Las Garzas con la dársena (escenario 1), y de la pluma de descarga de la planta de tratamiento (escenario 2), ambos escenarios bajo diferentes condiciones de marea.



ÍNDICE

1.	Introducción	1
2.	Base de datos	3
2.1	Mareas	3
2.2	Batimetría.....	5
3.	Mediciones oceanográficas	7
3.1	Mediciones con el perfilador Sontek.....	8
3.2	Mediciones del perfilador doppler RDI	14
3.3	Mediciones Lagrangeanas	19
3.4	Mediciones del campo de masa.....	24
4.	Descripción del modelo.....	34
5.	Modelación numérica.....	36
5.1	Simulación numérica bajo condiciones actuales	36
a)	Mareas vivas.....	40
b)	Mareas muertas	54
5.2	Simulación numérica bajo condiciones de ampliación	67
a)	Mareas vivas.....	69
b)	Mareas muertas.....	80
6.	Modelación numérica de la salinidad	91
7.	Conclusiones	101
8.	Referencias.....	105



Lista de Figuras

Figura 1.1 Bahía y Puerto de Manzanillo y laguna de Las Garzas.....	3
Figura 2.1 Batimetría cercana a Manzanillo, Colima. Modificado de GEBCO (2009).....	5
Figura 2.2 Batimetría de las Bahías de Santiago y Manzanillo. Modificado de SEMAR (1992)	6
Figura 2.3 Batimetría del puerto de Manzanillo. Modificado de API-MAN (2009).....	6
Figura 3.1 Esquema de mediciones de CTD, el anclaje y las secciones principales con el ADCP.	7
Figura 3.2 Sección de corrientes en la entrada del canal del Puerto de Manzanillo (abril 25, 2009 hora 00:24)	9
Figura 3.3 Sección 2 (abril 25, 2009. Hora 00:29).....	9
Figura 3.4 Sección 3 (abril 25, 2009. Hora 00:38)	10
Figura 3.5 Sección 4 (abril 25, 2009. Hora 00:42).....	10
Figura 3.6 Sección 5 (abril 25, 2009. Hora 00:56)	11
Figura 3.7 Sección 6 (abril 25, 2009. Hora 01:01).....	11
Figura 3.8 Sección 7 (abril 25, 2009. Hora 01:46)	12
Figura 3.9 Sección 8 (abril 25, 2009. Hora 01:51).....	12
Figura 3.10 Sección 9 (abril 25, 2009. Hora 01:56)	13
Figura 3.11 Sección 10 (abril 25, 2009. Hora 02:00).....	13
Figura 3.13 Nivel del mar y temperatura del agua a 15 m de profundidad.	15
Figura 3.14 Velocidad y dirección de las corrientes a distintas profundidades.....	17
Figura 3.15 Direccionalidad de la corriente. Capas superficial y de fondo.	18
Figura 3.16 Análisis de dirección preferencial. Capas superficial y de fondo.	18
Figura 3.17 Mediciones hidrográficas y deriva de flotadores. 22/Abril/2009.....	21
Figura 3.18 Mediciones hidrográficas y deriva de flotadores. 23/Abril/2009.....	22
Figura 3.19 Mediciones hidrográficas y deriva de flotadores. 25/Abril/2009.....	23
Figura 3.20 Ubicación de los puntos de muestreo de CTD. 22/Abril/2009.	25



Figura 3.21 Ubicación de los puntos de muestreo de CTD. 23/Abril/2009.	25
Figura 3.22 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 1.	26
Figura 3.23 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 2.	26
Figura 3.24 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 3.	27
Figura 3.25 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 4.	27
Figura 3.26 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 5.	28
Figura 3.27 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 6.	28
Figura 3.29 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 10.	29
Figura 3.30 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 11.	30
Figura 3.31 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 12.	30
Figura 3.32 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 13.	31
Figura 3.33 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 14.	31
Figura 3.34 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 15.	32
Figura 3.35 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 16.	32
Figura 3.36 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 16.	33
Figura 3.37 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 16.	34
Figura 5.1 Vista global de la discretización de dominio de cálculo.	37
Figura 5.2 Detalle de la malla de las bahías.	38
Figura 5.3 Detalle de la malla en el puerto de Manzanillo.	39
Figura 5.4 Señal de marea simulada en la bocana del puerto.	39
Figura 5.5 Comparación de los niveles de la superficie libre, medidos y simulados.	40
Figura 5.6 Comparación de la velocidad promediada en la vertical, medida y simulada.	40
Figura 5.7 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 23 abril 2009, 00:00 h	41
Figura 5.8 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 23 abril 2009, 08:00 h	42
Figura 5.9 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 23 abril 2009, 12:00 h	42
Figura 5.10 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 24 abril 2009, 16:00 h	43
Figura 5.11 Elevación de la superficie libre en el puerto. 24 abril 2009, 14:30 h.	44
Figura 5.12 Campo de velocidades. 24 abril 2009, 14:30 h.	44
Figura 5.13 Elevación de la superficie libre en el puerto. 24 abril 2009, 20:00 h.	45



Figura 5.14 Campo de velocidades. 24 abril 2009, 20:00 h	45
Figura 5.15 Elevación de la superficie libre en el puerto. 24 abril 2009, 23:00 h.....	46
Figura 5.16 Campo de velocidades. 24 abril 2009, 23:00 h	46
Figura 5.17 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 02:00 h.....	47
Figura 5.18 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 02:00 h	47
Figura 5.19 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 05:30 h.....	48
Figura 5.20 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 05:30 h	48
Figura 5.21 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 08:30 h.....	49
Figura 5.22 Campo de velocidades. 25/ABR/2009 08:30 hr.....	49
Figura 5.23 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 11:30 h.....	50
Figura 5.24 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 11:30 h	50
Figura 5.25 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 17:00 h.....	51
Figura 5.26 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 17:00 h	51
Figura 5.27 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 23:30 h.....	52
Figura 5.28 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 23:30 h	52
Figura 5.29 Elevación de la superficie libre en el puerto. 26 abril 2009, 05:30 h.....	53
Figura 5.30 Campo de velocidades. 26 abril 2009, 05:30 h	53
Figura 5.31 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 30 abril 2009, 04:00 h	54
Figura 5.32 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 30 abril 2009, 08:00 h	55
Figura 5.33 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 30 abril 2009, 16:00 h	55
Figura 5.34 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 1 mayo 2009, 20:00 h	56
Figura 5.35 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 04:30 h.....	57
Figura 5.36 Campo de elevaciones. 30 abril 2009, 04:30 h	57
Figura 5.37 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 09:00 h.....	58
Figura 5.38 Campo de elevaciones. 30 abril 2009, 09:00 h	58
Figura 5.39 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 14:30 h.....	59
Figura 5.40 Campo de elevaciones. 30 abril 2009, 14:30 h	59
Figura 5.41 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 21:00 h.....	60
Figura 5.42 Campo de elevaciones. 30 abril 2009, 21:00 h	60



Figura 5.43 Elevación de la superficie libre en el puerto. 1 mayo 2009, 03:00 h.....	61
Figura 5.44 Campo de elevaciones. 1 mayo 2009, 03:00 h	61
Figura 5.45 Elevación de la superficie libre en el puerto. 1 mayo 2009, 12:30 h.....	62
Figura 5.46 Campo de elevaciones. 1 mayo 2009, 12:30 h	62
Figura 5.47 Elevación de la superficie libre en el puerto. 1 mayo 2009, 21:00 h.....	63
Figura 5.48 Campo de elevaciones. 1 mayo 2009, 21:00 h	63
Figura 5.49 Elevación de la superficie libre en el puerto. 2 mayo 2009, 14:00 h.....	64
Figura 5.50 Campo de elevaciones. 2 mayo 2009, 14:00 h	64
Figura 5.51 Elevación de la superficie libre en el puerto. 2 mayo 2009, 20:30 h.....	65
Figura 5.52 Campo de elevaciones. 2 mayo 2009, 20:30 h	65
Figura 5.53 Elevación de la superficie libre en el puerto. 3 mayo 2009, 14:30 h.....	66
Figura 5.54 Campo de elevaciones. 3 mayo 2009, 14:30 h	66
Figura 5.55 Detalle de la malla en las Bahías.	67
Figura 5.56 Detalle de la malla en la laguna de Las Garzas.	68
Figura 5.57 Detalle de la malla en la franja ecológica y el canal de comunicación.	68
Figura 5.58 Elevación de la superficie libre en el puerto. 24 abril 2009, 14:30 h.....	70
Figura 5.59 Campo de velocidades. 24 abril 2009, 14:30 h	70
Figura 5.60 Elevación de la superficie libre en el puerto. 24 abril 2009, 20:00h.....	71
Figura 5.61 Campo de velocidades. 24 abril 2009, 20:00 h	71
Figura 5.62 Elevación de la superficie libre en el puerto. 24 abril 2009, 23:00 h.....	72
Figura 5.63 Campo de velocidades. 24 abril 2009, 23:00 h	72
Figura 5.64 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 02:00 h.....	73
Figura 5.65 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 02:00 h	73
Figura 5.66 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 05:30 h.....	74
Figura 5.67 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 05:30 h	74
Figura 5.68 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 08:30 h.....	75
Figura 5.69 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 08:30 h	75
Figura 5.70 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 11:30 h.....	76
Figura 5.71 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 11:30 h	76



Figura 5.72 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 17:00 h.....	77
Figura 5.73 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 17:00 h	77
Figura 5.74 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 23:30 h.....	78
Figura 5.75 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 23:30 h	78
Figura 5.76 Elevación de la superficie libre en el puerto. 26 abril 2009, 05:30 h.....	79
Figura 5.77 Campo de velocidades. 26 abril 2009, 05:30 h	79
Figura 5.78 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 04:30 h.....	81
Figura 5.79 Campo de velocidades. 30 abril 2009, 04:30 h	81
Figura 5.80 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 09:00 h.....	82
Figura 5.81 Campo de velocidades. 30 abril 2009, 09:00 h	82
Figura 5.82 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 14:30 h.....	83
Figura 5.83 Campo de velocidades. 30 abril 2009, 14:30 h	83
Figura 5.84 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 21:00 h.....	84
Figura 5.85 Campo de velocidades. 30 abril 2009, 21:00 h	84
Figura 5.86 Elevación de la superficie libre en el puerto. 1 mayo 2009, 03:00 h.....	85
Figura 5.87 Campo de velocidades. 1 mayo 2009, 03:00 h	85
Figura 5.88 Elevación de la superficie libre en el puerto. 1 mayo 2009, 12:30 h.....	86
Figura 5.89 Campo de velocidades. 1 mayo 2009, 12:30 h	86
Figura 5.90 Elevación de la superficie libre en el puerto. 1 mayo 2009, 21:00 h.....	87
Figura 5.91 Campo de velocidades. 1 mayo 2009, 21:00 h	87
Figura 5.92 Elevación de la superficie libre en el puerto. 2 mayo 2009, 14:00 h.....	88
Figura 5.93 Campo de velocidades. 2 mayo 2009, 14:00 h	88
Figura 5.94 Elevación de la superficie libre en el puerto. 2 mayo 2009, 20:30 h.....	89
Figura 5.95 Campo de velocidades. 2 mayo 2009, 20:30 h	89
Figura 5.96 Elevación de la superficie libre en el puerto. 3 mayo 2009, 14:30 h.....	90
Figura 5.97 Campo de velocidades. 3 mayo 2009, 14:30 h	90
Figura 6.1 Concentración de salinidad a 26 h de simulación, escenario1.....	93
Figura 6.2 Concentración de salinidad a 42.5 h de simulación, escenario1.....	94
Figura 6.3 Concentración de salinidad a 78.0 h de simulación, escenario1.....	94



Figura 6.4 Concentración de salinidad a 148.0 h de simulación, escenario1.	95
Figura 6.5 Concentración de salinidad a 26 h de simulación, escenario 2.	97
Figura 6.6 Concentración de salinidad a 42 h de simulación, escenario 2.	97
Figura 6.7 Concentración de salinidad a 78.0 h de simulación, escenario2.	98
Figura 6.8 Concentración de salinidad a 148.0 h de simulación, escenario2.	98
Figura 6.9 Comparativa de los escenarios 1 y 2 a 148.0 h de simulación.	99
Figura 6.10 Tiempo de residencia teórico calculado para varias pleamares.	100



1. Introducción

El sistema lagunar de Las Garzas – San Pedrito se encuentra localizado en la bahía de Manzanillo, Colima (figura 1.1). La laguna de San Pedrito se comunica al océano a través del canal de entrada del Puerto de Manzanillo y esta a su vez hacia Las Garzas. Por la construcción de un terraplén de carretera y un vertedor, se indujo una separación física entre la laguna de las Garzas y San Pedrito, y por consiguiente, se restringió el flujo de agua entre ambas lagunas, más aun la entrada de agua del océano a la Laguna de las Garzas. Esta separación ha propiciado, en Las Garzas, una acumulación de sedimentos y actualmente el nivel del fondo se encuentra por arriba del nivel medio del mar, con una profundidad de 0.60m.

Registros bibliográficos históricos del sistema lagunar muestran la existencia de una comunicación directa al mar, por lo que, una de las alternativas de restauración ambiental es regresar a esta condición. Experiencias anteriores de restauración, recomiendan que una forma para evaluar las opciones es la implementación de un modelo numérico de circulación. Este modelo debe ser capaz de representar las condiciones hidrodinámicas actuales y las condiciones de restauración que se propongan para mejorar la comunicación entre la laguna de las Garzas y San Pedrito. La condición de restauración está contemplado en el proyecto de ampliación del puerto de Manzanillo por parte de la API-Manzanillo.

En este estudio se evaluará una propuesta del funcionamiento hidrodinámico entre la laguna de las Garzas y San Pedrito, en la condición actual y la condición que se asemeje a lo indicado en los registros históricos, en donde se tenía una comunicación entre ambas lagunas. La condición histórica está basada en la propuesta de restauración y los espacios que requeridos en la ampliación del puerto que realiza la API-Manzanillo.



Para evaluar las opciones de restauración y escenarios de condiciones ambientales, actuales y futuras, se implementaron dos modelos numéricos hidrodinámicos. Un modelo bidimensional para evaluar los flujos de comunicación de todo el sistema, ya sea entre el océano hacia el puerto y entre el puerto y el sistema lagunar, y otro modelo del tipo tridimensional utilizado con el fin de cuantificar la distribución de la salinidad en la laguna de Las Garzas.

En cuerpos costeros el principal forzamiento que induce la circulación es la marea. Por lo tanto, para cuantificar su contribución en la circulación se llevó a cabo una campaña de monitoreo de variables físicas del sistema bajo las condiciones actuales. Las mediciones permitieron establecer cuantitativamente la hidrodinámica que prevalece en la dársena. Los resultados de mediciones de campo permitieron verificar y validar los resultados del modelo para las condiciones actuales. Con base a estos resultados, se tuvo un indicador de confianza en el uso del modelo hidrodinámico para evaluar las nuevas condiciones de ampliación del puerto y de funcionamiento hidráulico del canal de comunicación entre las lagunas.

Para los escenarios de modelación de las condiciones actuales se consideraron diferentes condiciones de marea y, asimismo, se considero la descarga hacia la laguna de la planta de tratamiento de aguas residuales municipal (PTAR). Para las condiciones de proyecto se considero la comunicación de la dársena con la laguna de Las Garzas y la descarga de la PTAR y de igual forma se consideraron diferente escenarios de marea.

Los resultados principales se estableció la relación de dispersión temporal y concentración de salinidad en la laguna de las Garzas, tanto por la entrada de agua dulce desde la PTAR, así como el ingreso de agua mar desde el puerto. De esta manera, se estableció la

dispersión de la descarga de la PTAR a la laguna de Las Garzas, la capacidad de dilución del cuerpo receptor y el tiempo de residencia.

Los resultados de la modelación permitieron determinar la funcionalidad de una franja de manglar de 60 m de amplitud que se establecerá entre San Pedrito y la colonia Brisas, que en condición ideal, deberá de ser inundada por efecto de marea.

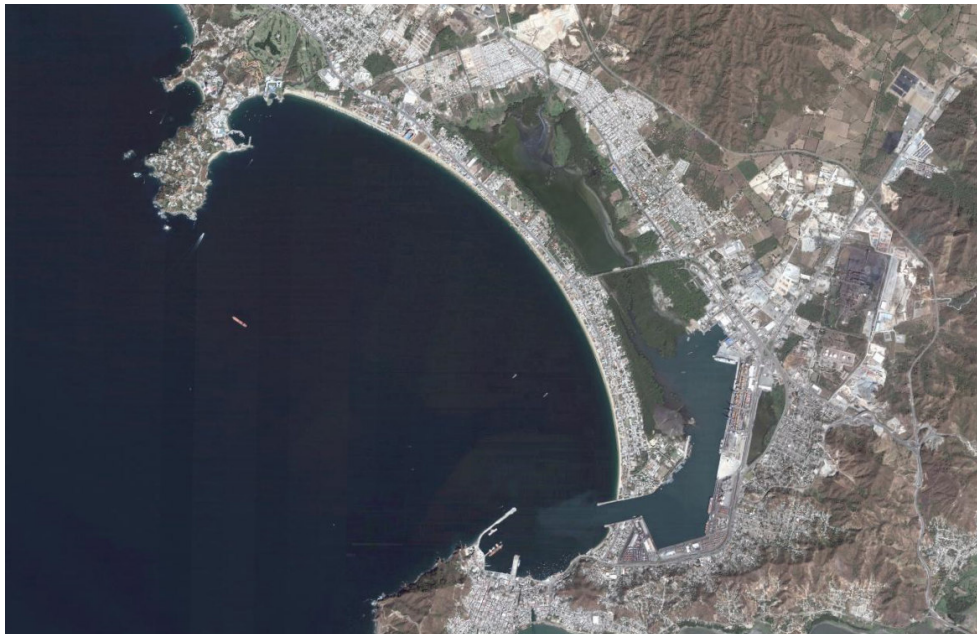


Figura 1.1 Bahía y Puerto de Manzanillo y laguna de Las Garzas.

2. Base de datos

2.1 Mareas

El tipo de marea se puede caracterizar a través del número de forma, el cual es definido como:



$$f = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2}$$

y es la razón de la suma de amplitudes de las dos componentes principales de la marea en la banda diurna ($K_1 + O_1$) y la suma de las dos componentes principales en la banda semi-diurna ($M_2 + S_2$). Se considera que la marea tiene carácter semi-diurno para un número de forma entre 0.0 y 0.25; es de tipo mixto para valores mayores de 0.25 hasta 3.0 y; es diurna si el número de forma es mayor que 3.0. El número de forma en el Puerto de Manzanillo es de $f = 0.96$, por lo que el tipo de marea es de tipo mixto predominantemente semi-diurno.

En los registros de marea del sitio la pleamar máxima es 0.848 m y la bajamar mínima registrada de -0.889 m, ambos datos es con respecto al nivel medio del mar (Tablas de Predicción de Mareas). El rango máximo de marea es 1.73 m.

Para la simulación hidrodinámica se consideraron siete componentes armónicas de la marea (Tabla 2.1). Los valores de amplitudes y fase de cada componente a lo largo de la frontera del dominio de cálculo, se obtuvieron de la base de datos de marea de Leprovost *et al.* (1994). Donde T es el periodo (en horas), y C (en metros) y α (adimensional) son los coeficiente de la marea de equilibrio.

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.

2.2 Batimetría

Para implementar el modelo de circulación del puerto de Manzanillo, se hizo uso de tres bases de datos batimétricas; la primera de ellas, GEBCO (*General bathymetric chart of the oceans*), la cual cubre todo el globo terrestre con una resolución de una grado en latitud y longitud. De esta base de datos se extrajo un dominio aproximado de 370 x 450 km (figura 2.1). La segunda base de datos consultada, fue el Portulano número 21342A de la Secretaría de Marina, de la cual se obtuvo la batimetría de las bahías de Manzanillo y Santiago. Finalmente, la tercera base de datos fue la batimetría proporcionada por la Administración Portuaria Integral (API) de Manzanillo producto de mediciones realizadas en el interior del puerto (figura 2.3).

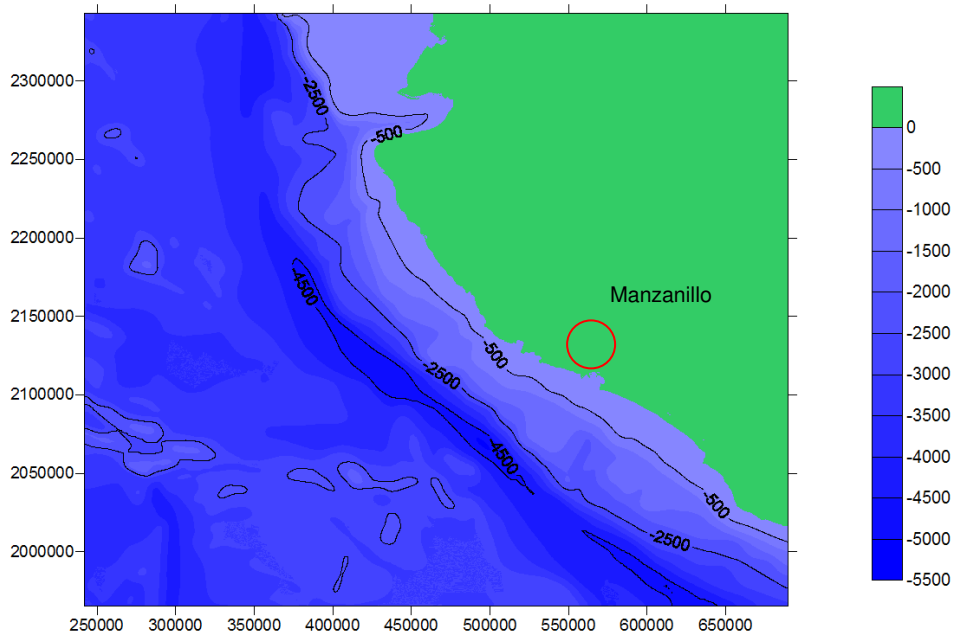


Figura 2.1 Batimetría cercana a Manzanillo, Colima. Modificado de GEBCO (2009)

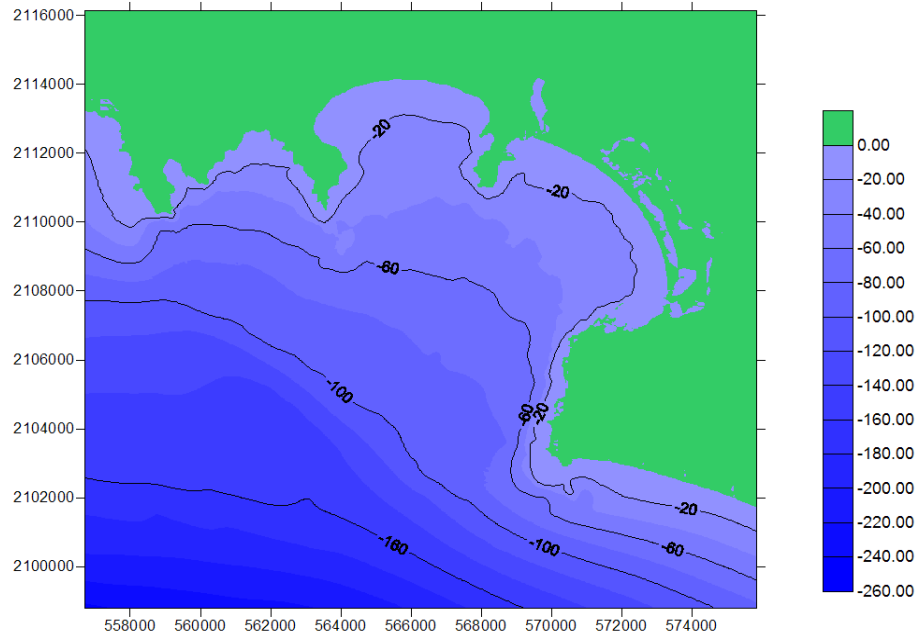


Figura 2.2 Batimetría de las Bahías de Santiago y Manzanillo. Modificado de SEMAR (1992)

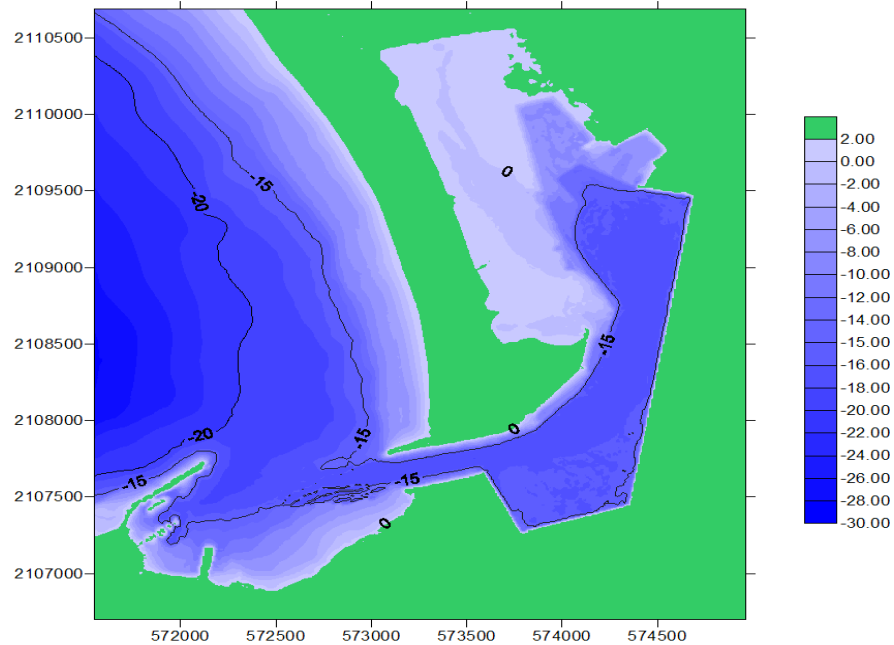


Figura 2.3 Batimetría del puerto de Manzanillo. Modificado de API-MAN (2009)

3. Mediciones oceanográficas

Con la finalidad de establecer la dinámica del Puerto de Manzanillo se llevaron a cabo una serie de mediciones de corrientes y CTD (*Conductivity/Temperature/Depth Profiler, marca Sea-Bird-Electronics*) al interior del puerto durante el periodo del 21 al 25 de abril de 2009. Es evidente que la marea es el principal forzamiento al interior del puerto, para establecer la circulación inducida por la marea se llevó a cabo una serie de mediciones con flotadores lagrangeanos y tres medidores ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers) (dos de la marca *Sontek* montados en un catamarán y uno de la marca *RD&Instruments* anclado en el canal de entrada al puerto). Para establecer la estructura vertical de la masa de agua se hicieron lances con la sonda CTD en la entrada del puerto y al interior del mismo. El periodo de mediciones corresponde a mareas vivas, donde los rangos entre la pleamar, bajamar y corrientes son máximos. En la figura 3.1 se muestra el esquema de muestreo que siguió durante la campaña de mediciones.



Figura 3.1 Esquema de mediciones de CTD, el anclaje y las secciones principales con el ADCP.



3.1 Mediciones con el perfilador Sontek

Para las mediciones de corrientes se utilizaron dos medidores ADCP montados en un catamarán. El sistema de medición consiste de un ADCP de 1500 kHz, una unidad de procesamiento y una computadora portátil. El ADCP permite hacer mediciones de la estructura vertical de la velocidad en la columna de agua. Por lo tanto, se hicieron secciones en la entrada del canal al puerto y al interior del mismo. Como procedimiento de uso se definió el esquema de medición (tamaño de celda y tiempo de promediado) y calibración la brújula.

En la figura 3.2 a figura 3.11 se presenta el despliegue de datos para cada una de las secciones. En la grafica superior se presenta la trayectoria de de la sección en coordenadas geográficas (línea azul) y el punto final de la sección es marcado con un círculo. A lo largo de la línea azul se observan los vectores correspondientes a la velocidad promedio del perfil (línea verde). Finalmente, en la grafica inferior se observa la sección transversal y los valores de la velocidad en la vertical. La escala de colores indica la intensidad de la corriente. Dependiendo de la sección si esta es orientada norte-sur, como es el caso de la entrada del canal al puerto, se graficó la componente E (East), por lo tanto las velocidades positivas son en dirección Este y las velocidades negativas son en dirección Oeste.

Esta serie de mediciones son posteriores al pico de de pleamar máxima registrada el día 24 de abril de 2009 a las 21:21 h. La primera sección se llevo a cabo el 25 de abril de 2009 a las 00:24 h. Como el nivel de la marea ya esta descendiendo se espera que el refluo barotrópico sea hacia fuera del puerto. Sin embargo, las mediciones nos indican que la estructura de la velocidad es compleja con fuertes gradientes en la vertical y con una circulación evidente de dos capas.

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

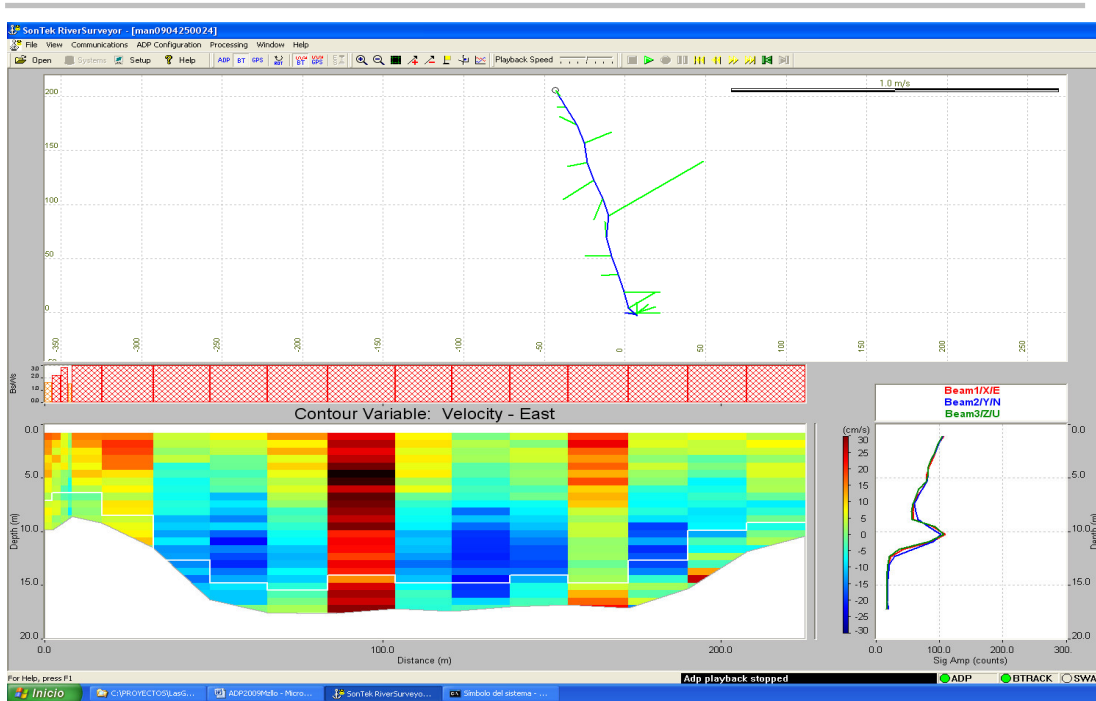


Figura 3.2 Sección de corrientes en la entrada del canal del Puerto de Manzanillo (abril 25, 2009 hora 00:24)

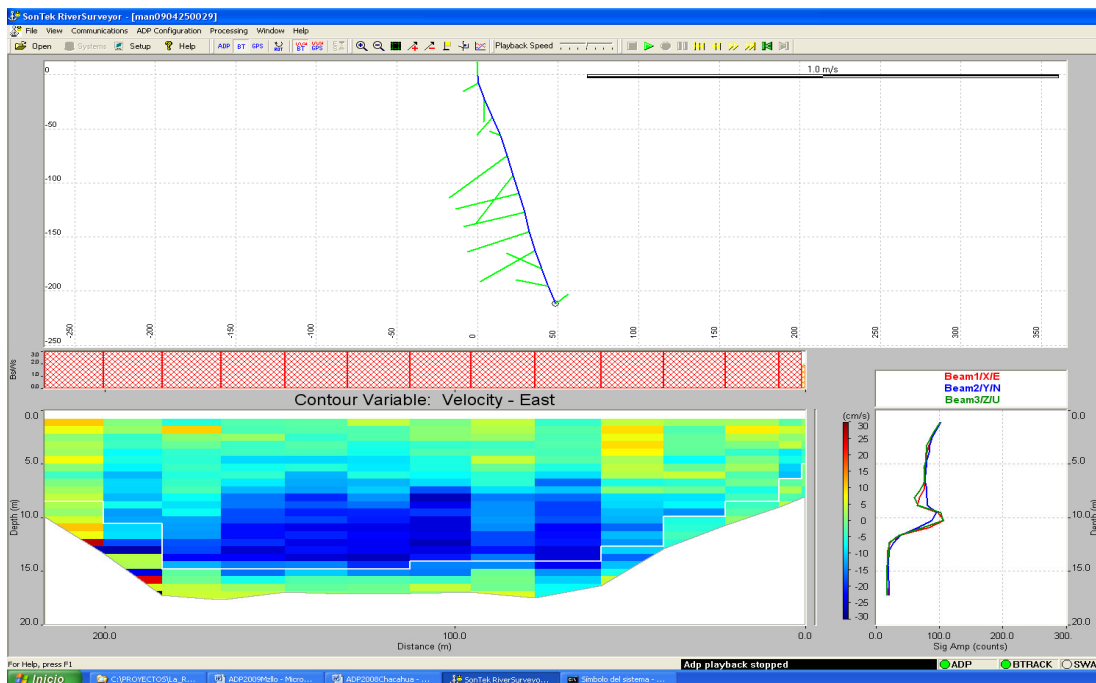


Figura 3.3 Sección 2 (abril 25, 2009. Hora 00:29).



Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

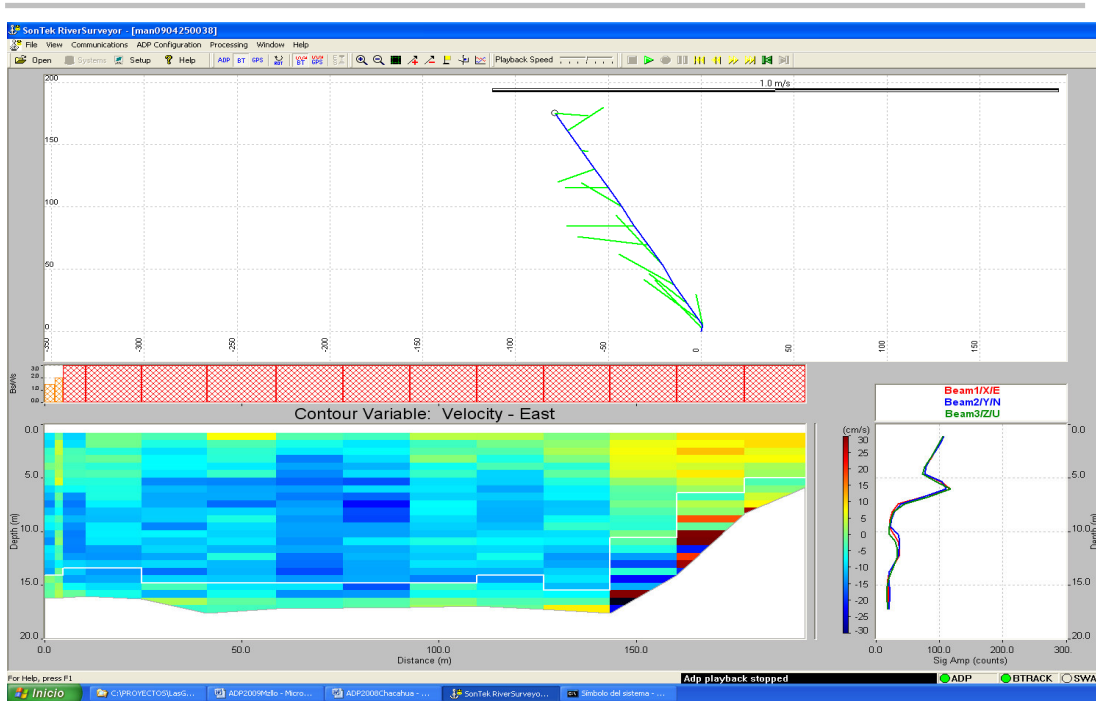


Figura 3.4 Sección 3 (abril 25, 2009. Hora 00:38)

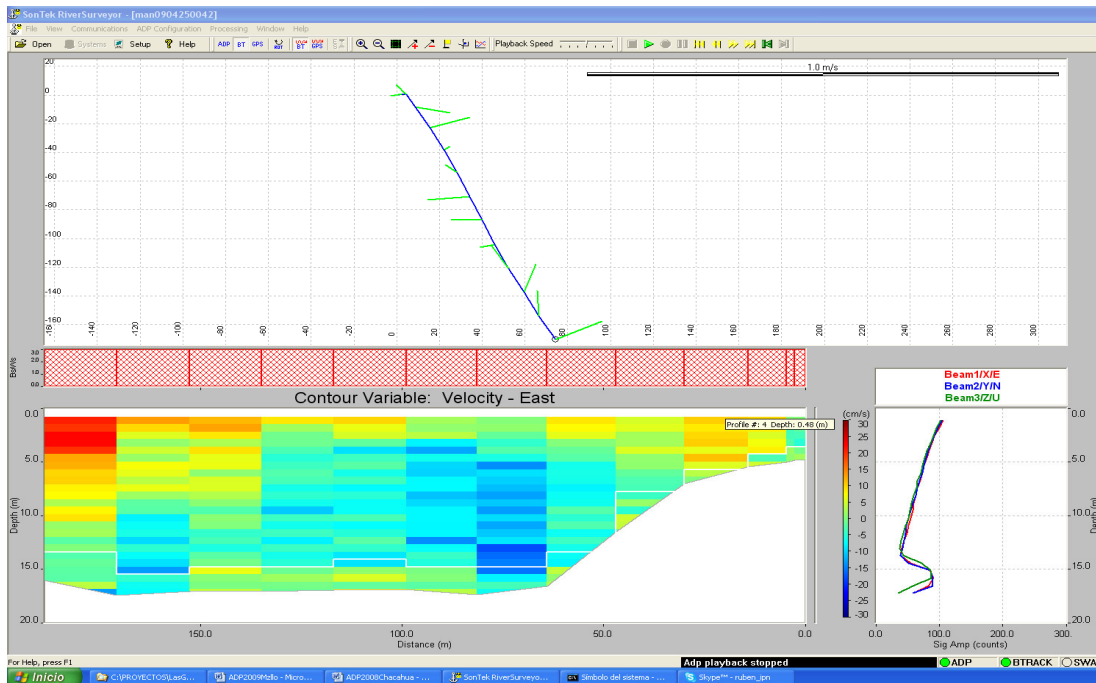


Figura 3.5 Sección 4 (abril 25, 2009. Hora 00:42).

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

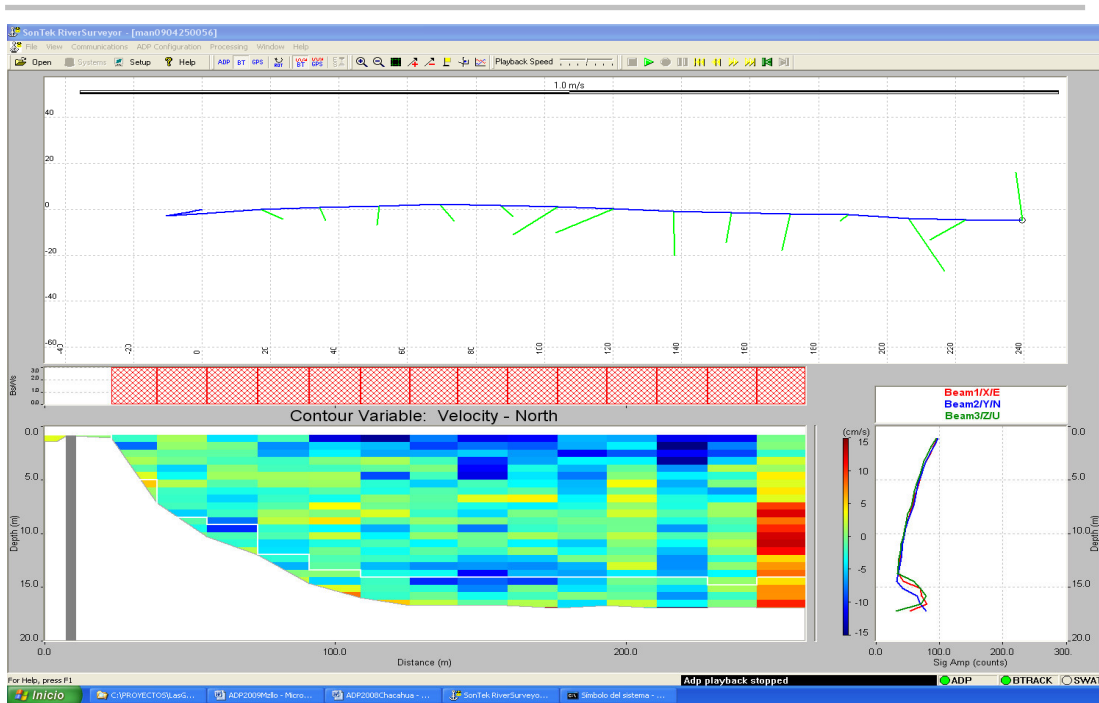


Figura 3.6 Sección 5 (abril 25, 2009. Hora 00:56)

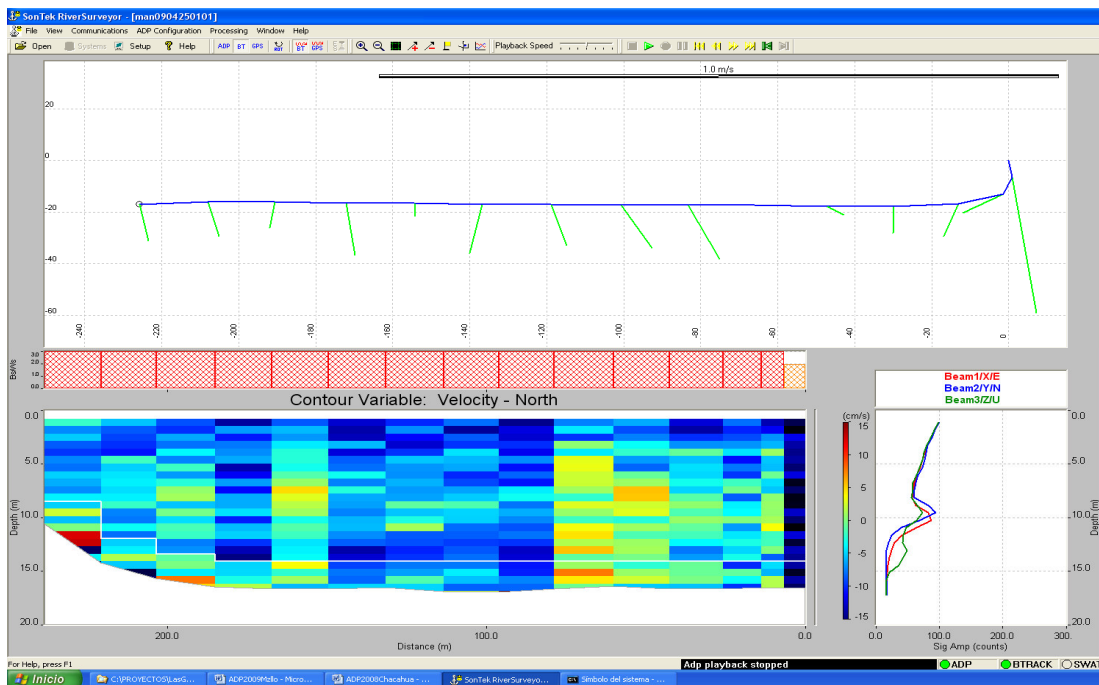


Figura 3.7 Sección 6 (abril 25, 2009. Hora 01:01).

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

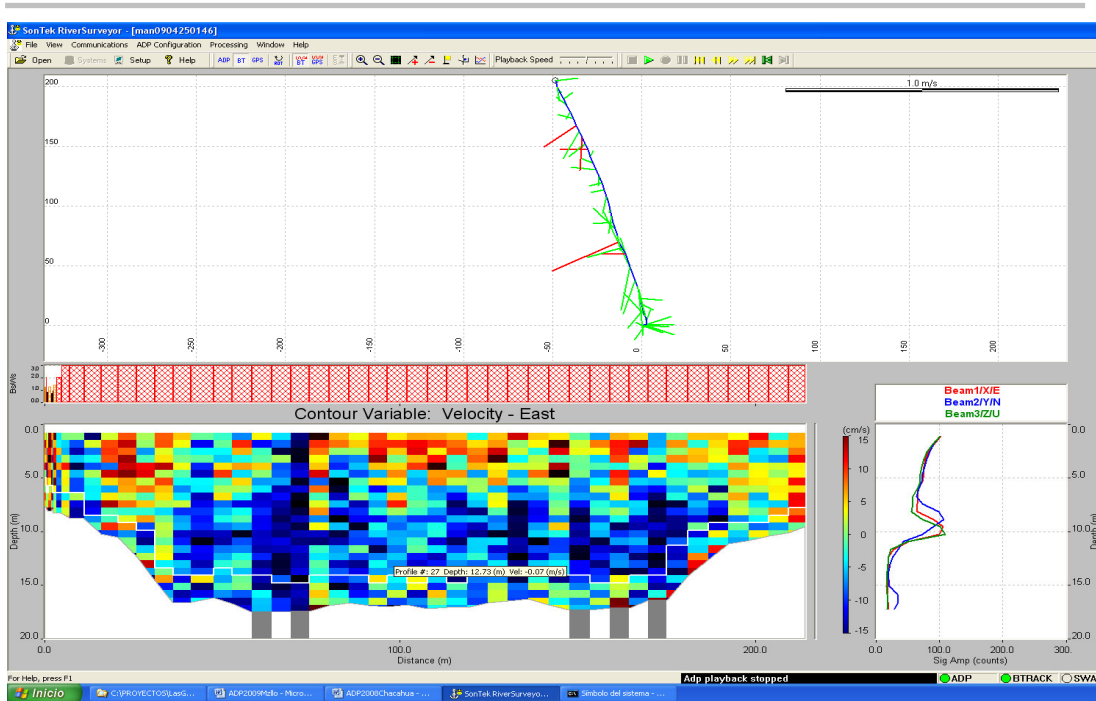


Figura 3.8 Sección 7 (abril 25, 2009. Hora 01:46)

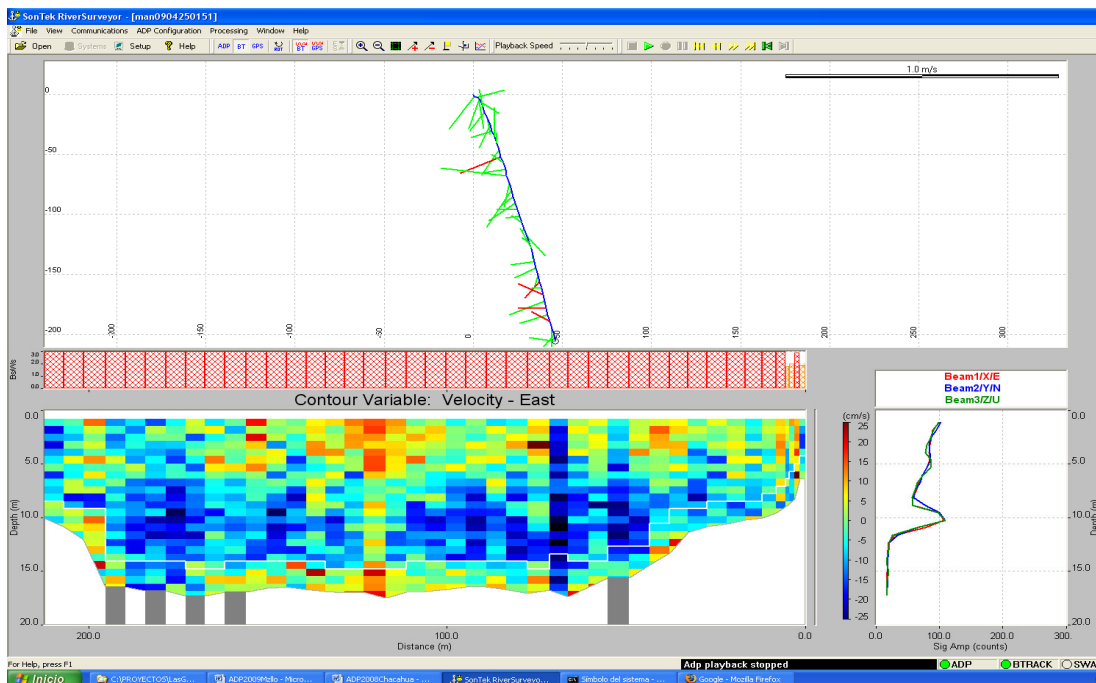


Figura 3.9 Sección 8 (abril 25, 2009. Hora 01:51).

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

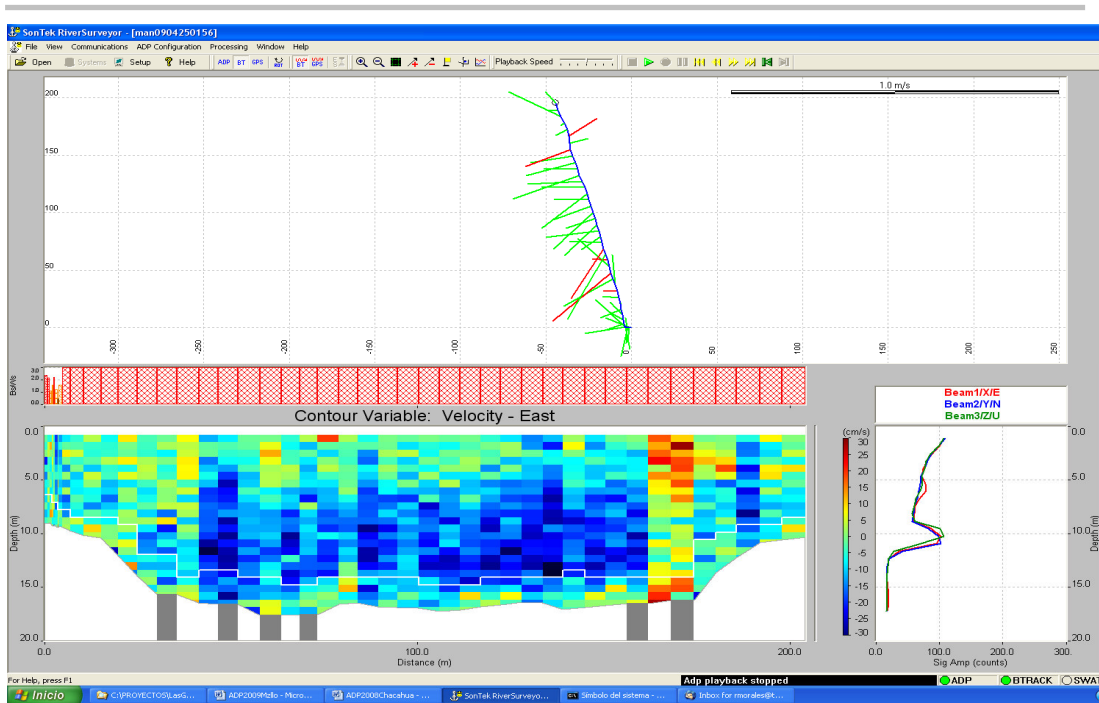


Figura 3.10 Sección 9 (abril 25, 2009. Hora 01:56)

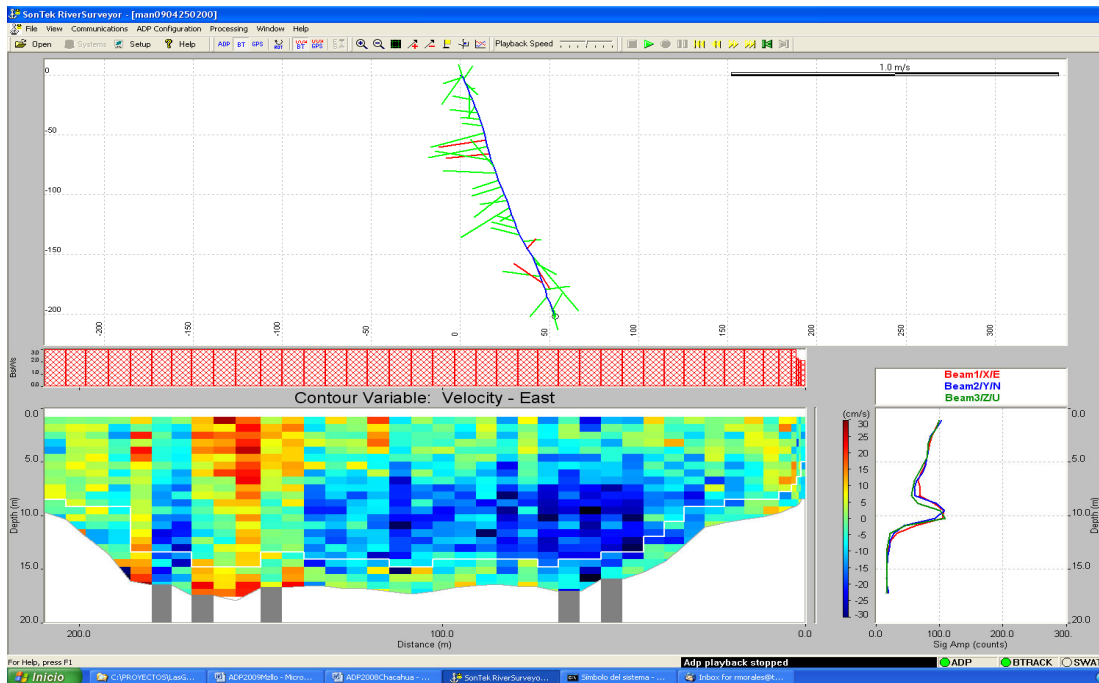


Figura 3.11 Sección 10 (abril 25, 2009. Hora 02:00).

3.2 Mediciones del perfilador doppler RDI

Para la medición de las corrientes, nivel del mar y temperatura en el fondo del, se ancló un medidor ADCP, marca RD&Instruments de 600 kHz modelo Sentinel, a una profundidad de 15 m, aproximadamente. El intervalo de medición fue cada media hora con celdas a cada metro de profundidad. El anclaje se hizo el día 22 de abril y el equipo se recuperó el 25 de abril de 2009. En la figura 3.12 se presenta la estructura de anclaje con el perfilador montado en su parte superior.



Figura 3.12 Medidor ADCP marca RD&Instruments de 600 kHz.

Nivel del mar y temperatura de fondo

De acuerdo con la información recabada (Figura 3.13), durante los días de muestreo las variaciones inducidas por la marea fueron de tipo diurno y semidiurno, con rangos máximos del orden de 1 m. Estas características son las mismas a las reportadas por pronóstico de marea para Manzanillo.

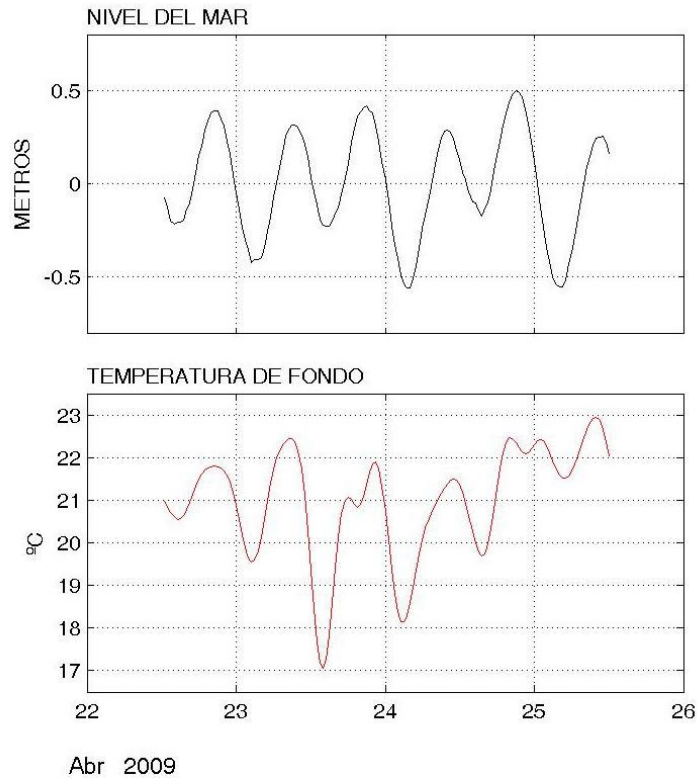


Figura 3.13 Nivel del mar y temperatura del agua a 15 m de profundidad.

Por su parte, los registros de la temperatura del agua de la capa de fondo (figura 3.13), muestran una evolución temporal caracterizada por la ocurrencia de fluctuaciones, acopladas con las fases de la marea, que indican que existía una diferencia importante entre la temperatura del agua que ingresaba (por el fondo) al puerto, durante la fase hacia marea alta, y la que salía de él, durante la fase contraria. Este comportamiento se mantuvo a lo largo de todo el período de muestreo, si bien, el rango máximo de variación (5 °C) ocurrió únicamente durante un solo día.



Nivel del mar y corrientes

Los registros de corrientes para distintas profundidades (figura 3.14), revelan el desarrollo de patrones de flujo que no corresponden a la condición esperada, considerando la orientación prácticamente este-oeste, del canal de entrada al puerto. El comportamiento atípico de la corriente se dio con respecto a diferentes facetas. Durante la progresión de marea alta a baja, i.e., cuando el agua sale del puerto y se esperara el desarrollo de flujos este-oeste (es decir, paralelos al canal), la corriente superficial prácticamente fue nula, mientras que la de fondo tendió a fluir hacia el centro del canal.

Por otra parte, durante la fase de marea baja a alta, i.e., cuando el agua ingresa, se alcanzó la velocidad superficial máxima (con valores pico cercanos a 70 cm/s), la cual, sin embargo, estuvo asociada con un flujo prácticamente perpendicular al canal. Durante esta fase, el movimiento del agua en las capas profundas fue sumamente lento.

En resumen, el contraste y la asimetría, entre la magnitud y la persistencia de las corrientes de las capas superficial y de fondo, visualizado de forma simple con base en la representación polar de los datos (figura 3.14 y figura 3.15), es indicativo del dominio de la componente baroclínica del flujo, lo cual pone de manifiesto el efecto impuesto por las características del campo de masa, que se corrobora con las mediciones en el inciso siguiente.

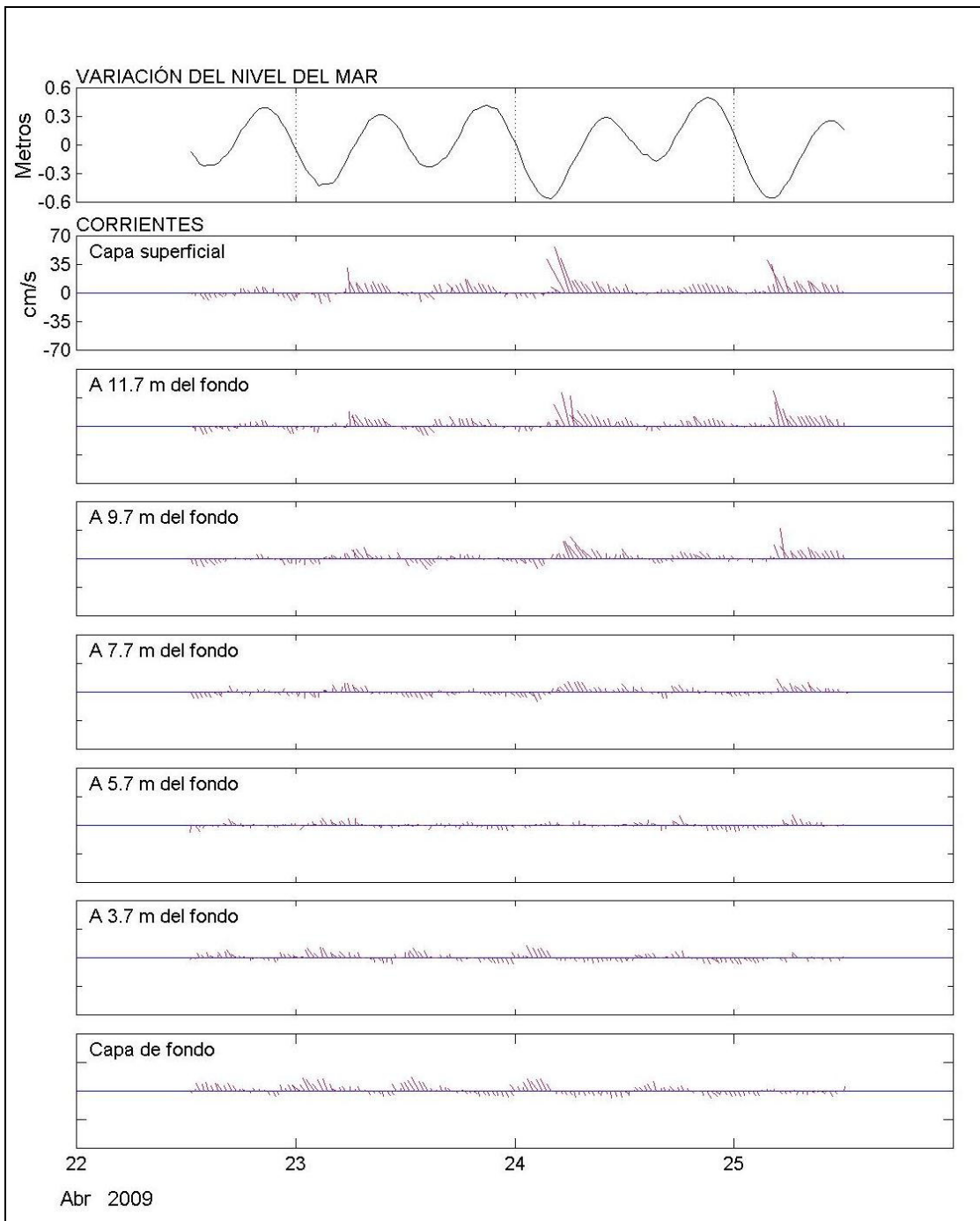


Figura 3.14 Velocidad y dirección de las corrientes a distintas profundidades.



Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

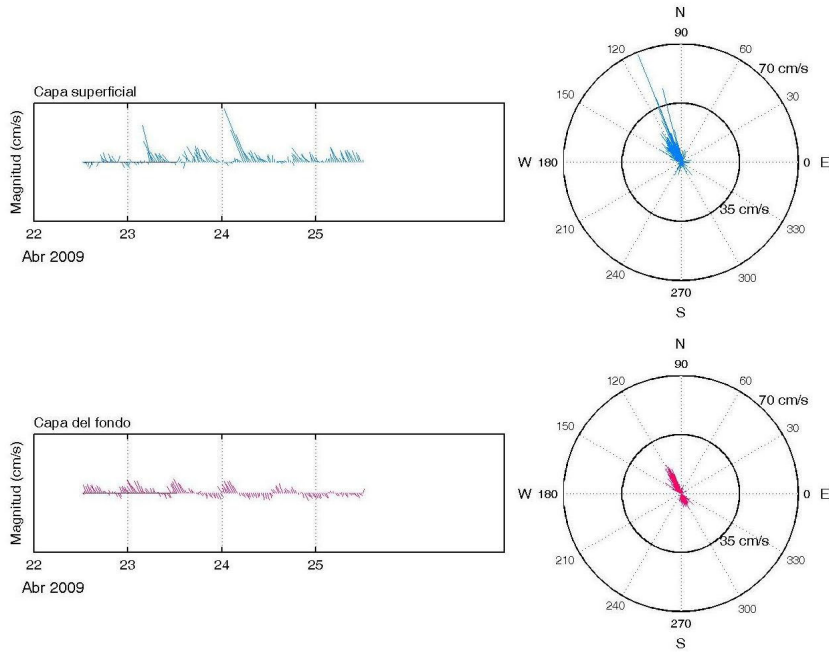


Figura 3.15 Direccionalidad de la corriente. Capas superficial y de fondo.

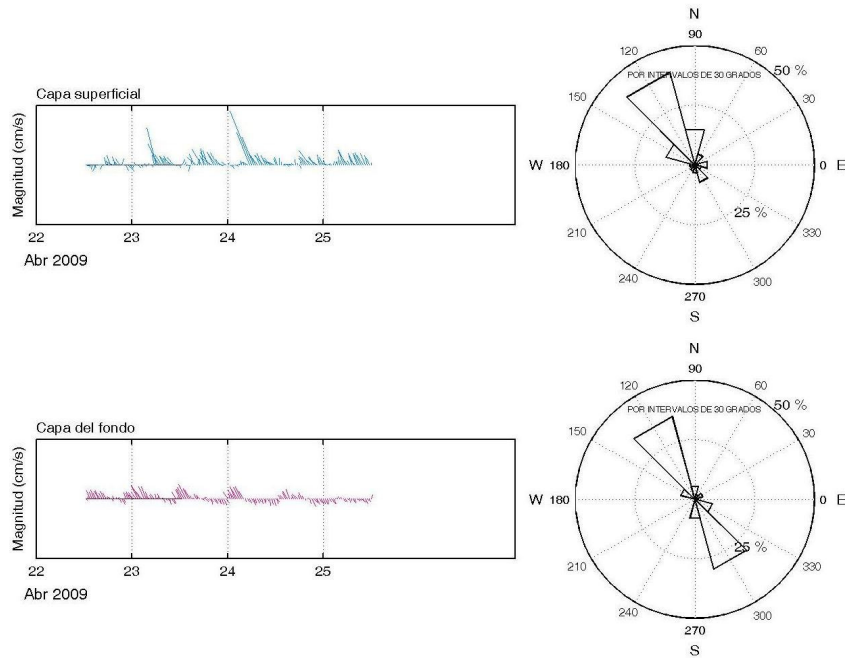


Figura 3.16 Análisis de dirección preferencial. Capas superficial y de fondo.

3.3 Mediciones Lagrangeanas

Se realizaron tres experimentos de deriva, que consiste en seguir la trayectoria dos o mas flotadores, los cuales fueron completados durante progresiones de marea baja a alta (22 de abril), y de alta a baja (23 y 25 de abril). Algunos experimentos fueron iniciados pero no pudieron ser terminados, debido a las perturbaciones causadas por el paso de embarcaciones.

Durante el primer experimento, del 22 de abril (figura 3.17), se liberaron tres flotadores, en sitios cercanos a la escollera norte, al centro del canal y a la escollera sur, respectivamente. La condición del nivel del mar progresaba de marea baja a marea alta, por lo cual el agua debía de entrar al puerto.

La deriva de los flotadores correspondió a la condición esperada, con la particularidad, de que el flotador cercano a la escollera sur y un tanto el flotador del centro del canal, describieron trayectorias que indican que la corriente superficial no transitó a lo largo del canal, de forma completamente paralela a las escolleras, sino con cierto ángulo. Este efecto fue también registrado por el ADCP montado en el fondo.

El segundo experimento (del 23 de abril) se realizó durante una progresión de marea alta a baja (figura 3.18). En este caso se liberó únicamente un flotador. Esto, en orden de maximizar el uso de la lancha, pues simultáneamente se realizaron los muestreos de las propiedades físicas y químicas del agua, y se hicieron aforos en la sección.

En función de la fase de marea, la condición esperada era la salida del agua a través del canal. La trayectoria del flotador indica que efectivamente se presentó un flujo de salida, en el centro del canal, pero de acuerdo con la deriva inicial y los registros del ADCP, la corriente dominante en el área de la escollera sur fue prácticamente perpendicular.

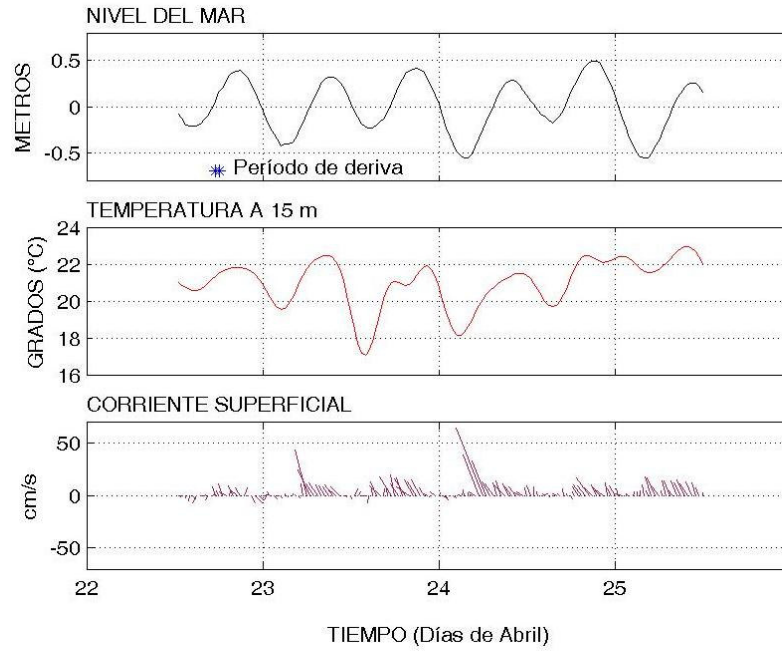


El tercer y último experimento se desarrolló (el 25 de abril) bajo una condición de marea progresando de alta a baja y durante este ciclo se presentó el rango de marea más amplio de todo el período de mediciones.

Similarmente al caso anterior, en este experimento se utilizó un solo flotador, cuya trayectoria (figura 3.19) indica, que mientras el agua salía del puerto (por el fondo, de acuerdo con los aforos), la corriente superficial en el centro del canal era lenta, pero en dirección opuesta. El lento movimiento de la capa superficial, en el área de la escollera sur, fue también detectado por los equipos ADCP.

Respecto al último período de las series de tiempo se debe notar que pese a presentarse el rango más amplio de marea. Los picos de velocidad reportados en días anteriores, ya no se detectaron el día 25, tampoco las fluctuaciones de la temperatura del agua y durante ese día fueron las mismas a los días previos.

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

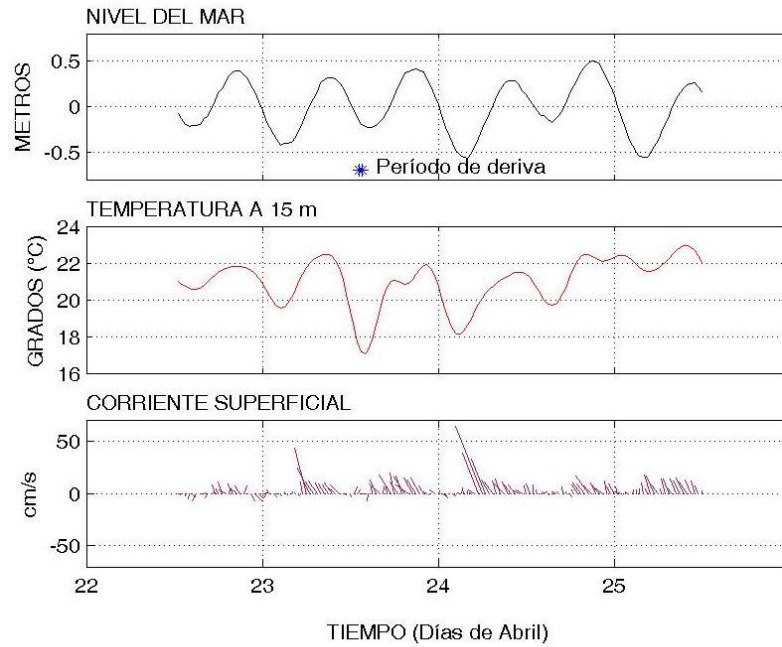


DERIVA DE FLOTADORES. Velocidad máxima de deriva = 16 cm/s



Figura 3.17 Mediciones hidrográficas y deriva de flotadores. 22/Abril/2009

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

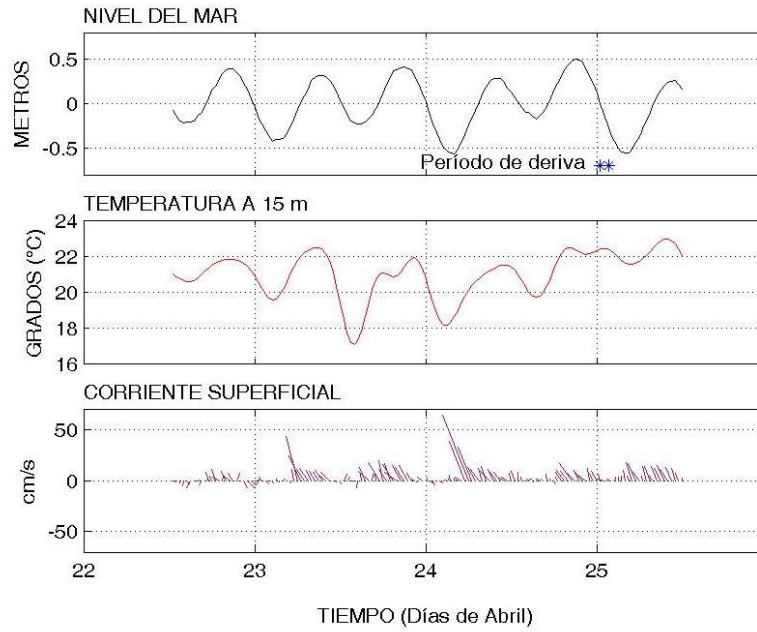


DERIVA DE FLOTADORES. Velocidad máxima de deriva = 13.4 cm/s



Figura 3.18 Mediciones hidrográficas y deriva de flotadores. 23/Abril/2009

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima



DERIVA DE FLOTADORES. Velocidad máxima de deriva = 8.5 cm/s



Figura 3.19 Mediciones hidrográficas y deriva de flotadores. 25/Abril/2009

3.4 Mediciones del campo de masa.

Para establecer la estructura vertical de la columna de agua en el área del puerto se llevaron a cabo mediciones de temperatura y salinidad con respecto a la profundidad. Para esto se utilizó un CTD (*Conductivity, Temperature and Depth* modelo *SBE 19plus SeaCat profiler Sea-Bird-Electronics*). El procedimiento de uso del CTD se le conoce como Lance, lo que es sumergir el equipo con una cuerda desde la superficie al fondo, en un sitio definido y geo-referenciado, la duración del Lance lo define la activación y desactivación del CTD mediante un interruptor. Para este estudio los Lances de CTD se llevaron a cabo al interior del puerto durante el 23 y 24 de abril de 2009 (figura 3.20 y figura 3.21). En las figura 3.22 a figura 3.36, se presentan los perfiles de salinidad (UPS), temperatura y densidad (σ_t) *versus* profundidad. Como se puede observar en las figuras 3.20 a 3.36, las estaciones de CTD muestran un gradiente muy marcado en la temperatura en la entrada al puerto y condiciones más homogéneas al interior de la dársena.



Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

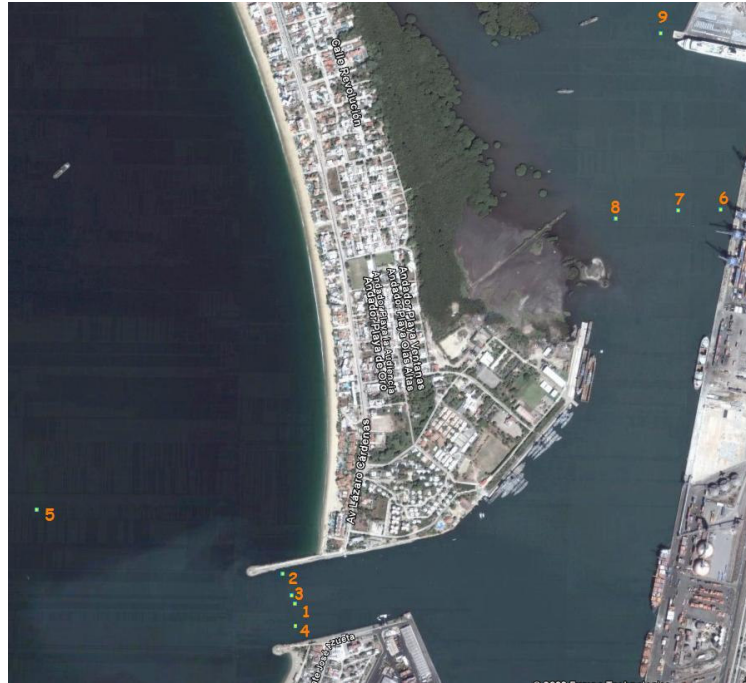


Figura 3.20 Ubicación de los puntos de muestreo de CTD. 22/Abril/2009.



Figura 3.21 Ubicación de los puntos de muestreo de CTD. 23/Abril/2009.

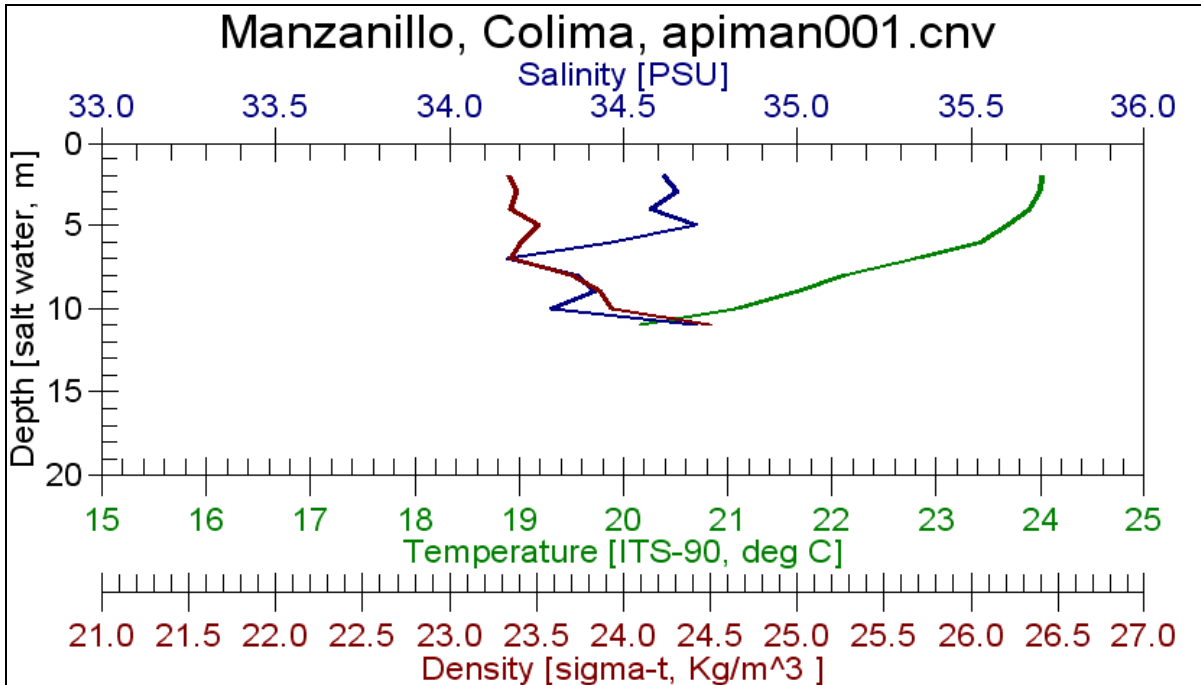


Figura 3.22 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 1.

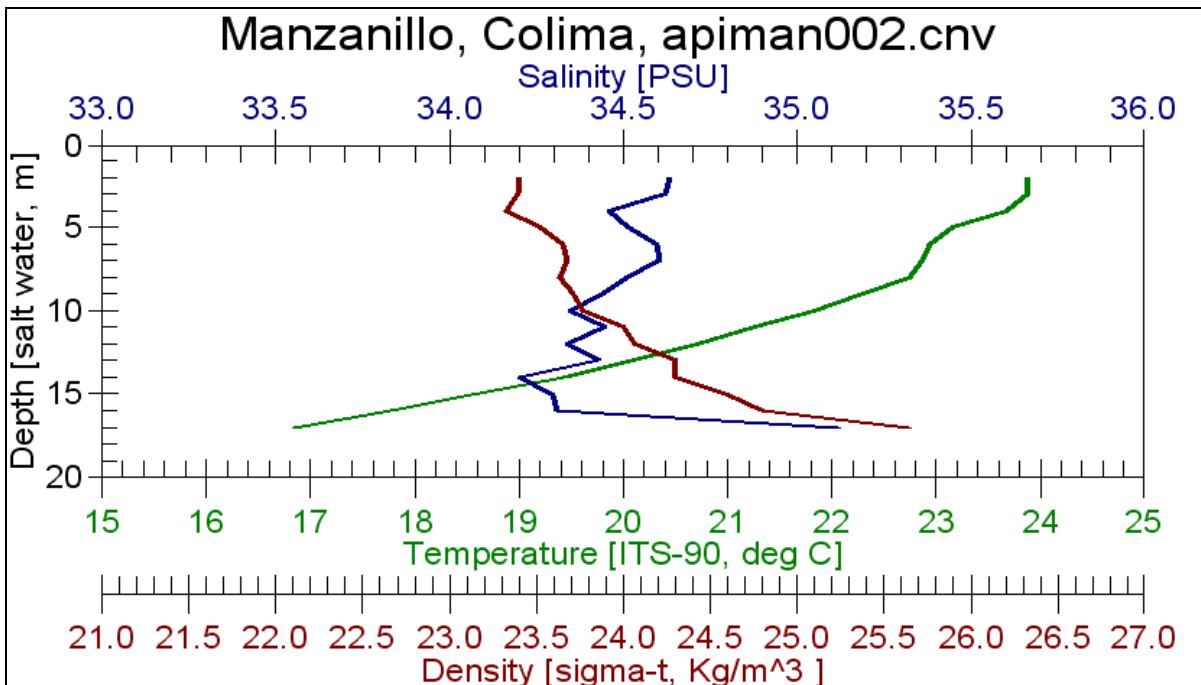


Figura 3.23 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 2.

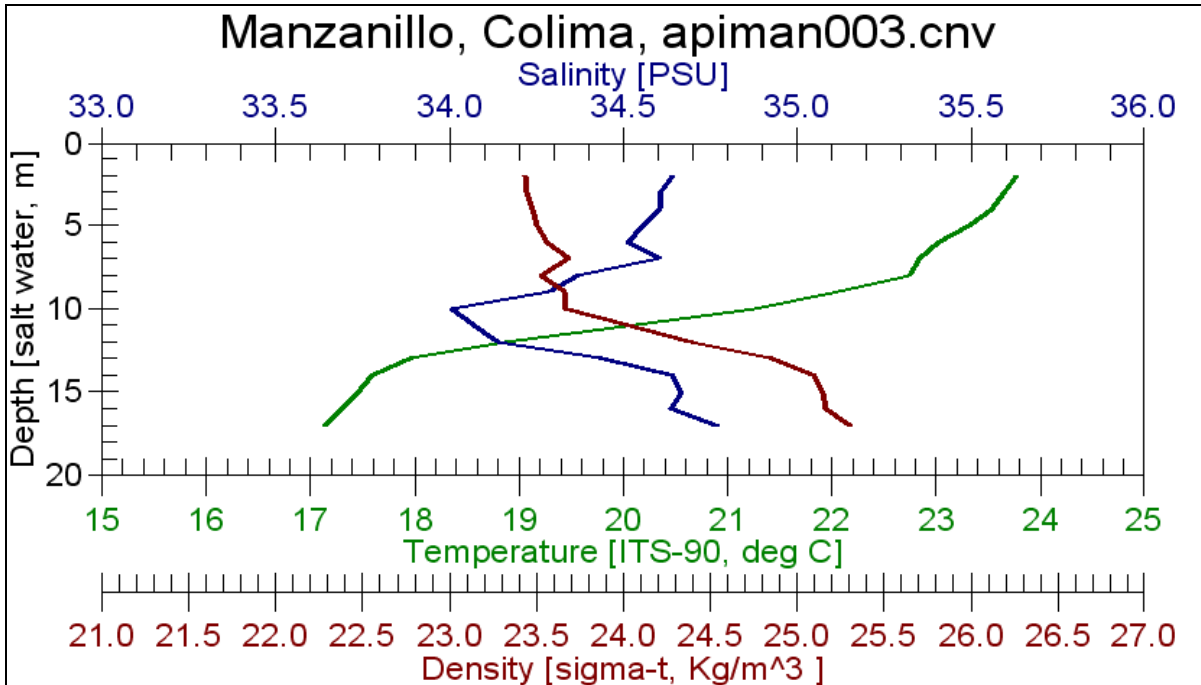


Figura 3.24 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 3.

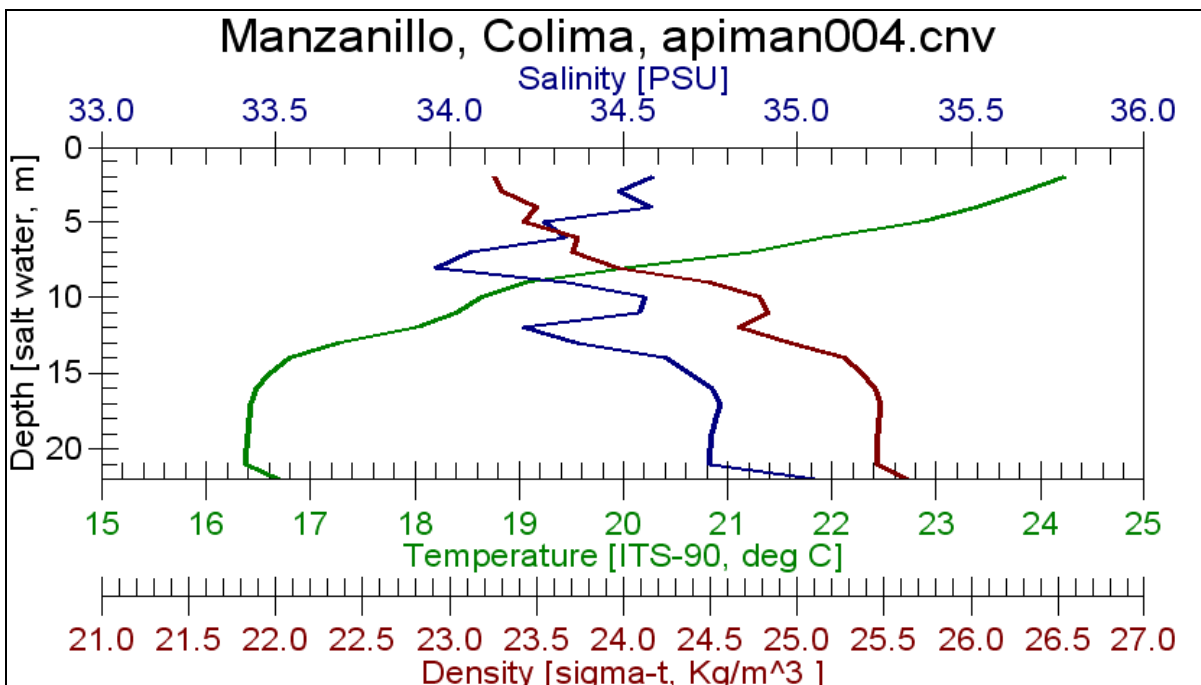


Figura 3.25 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 4.

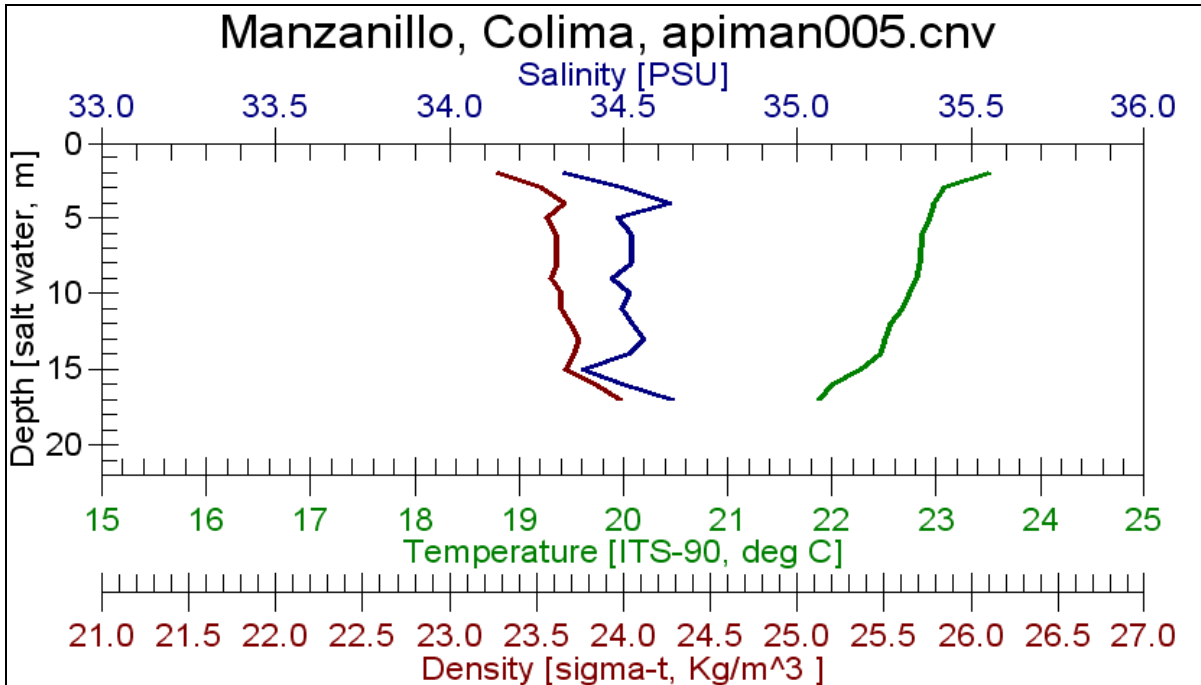


Figura 3.26 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 5.

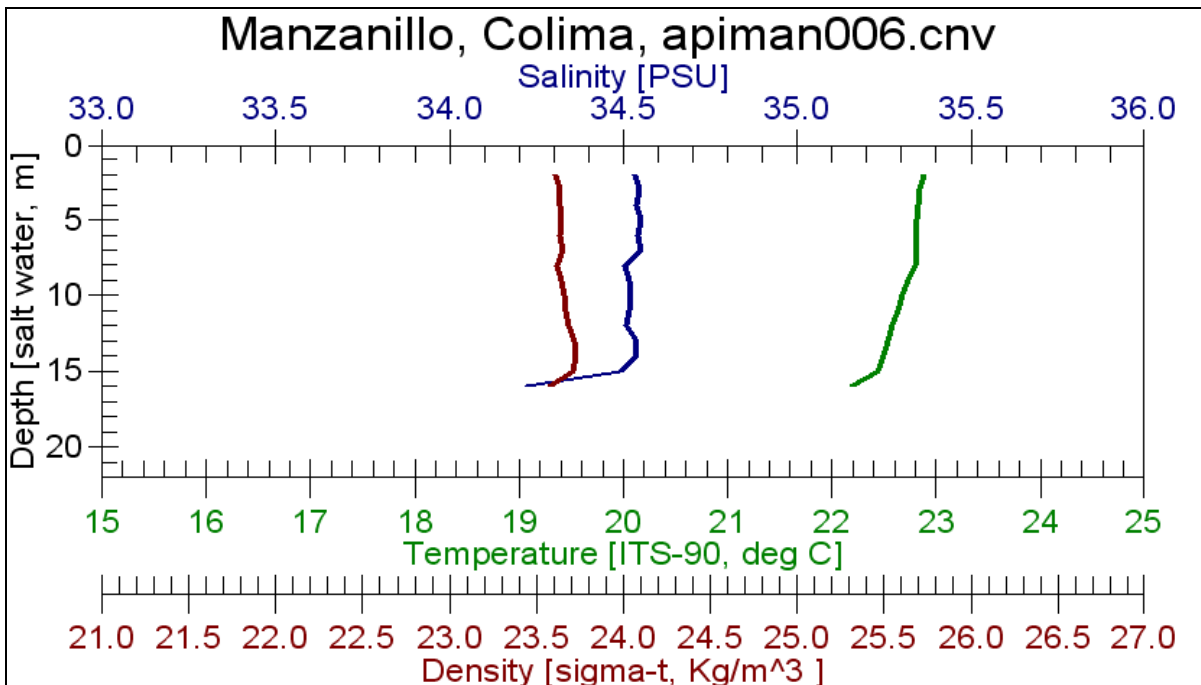


Figura 3.27 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 6.

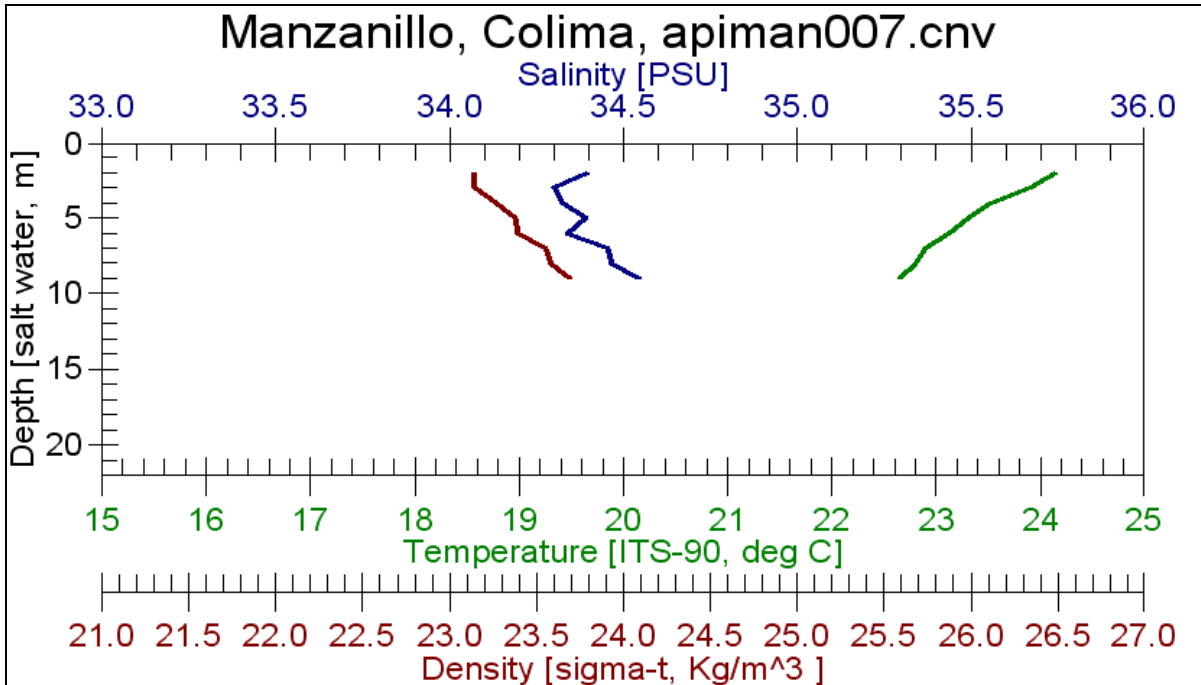


Figura 3.28 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 7.

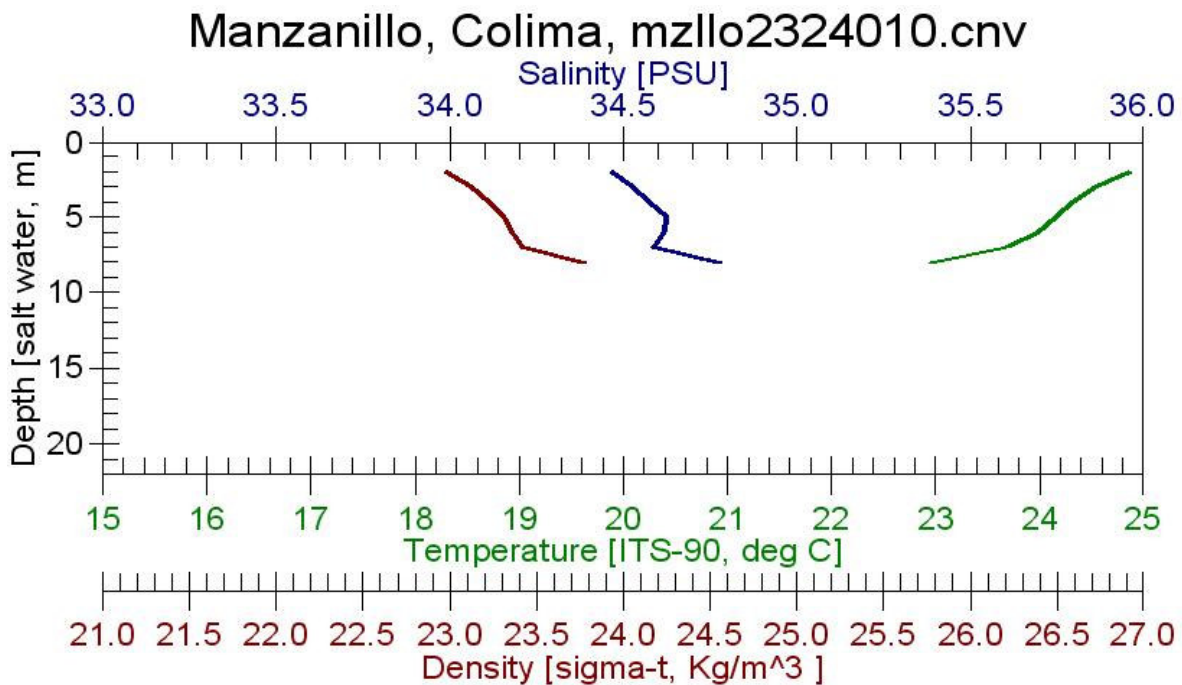


Figura 3.29 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 10.

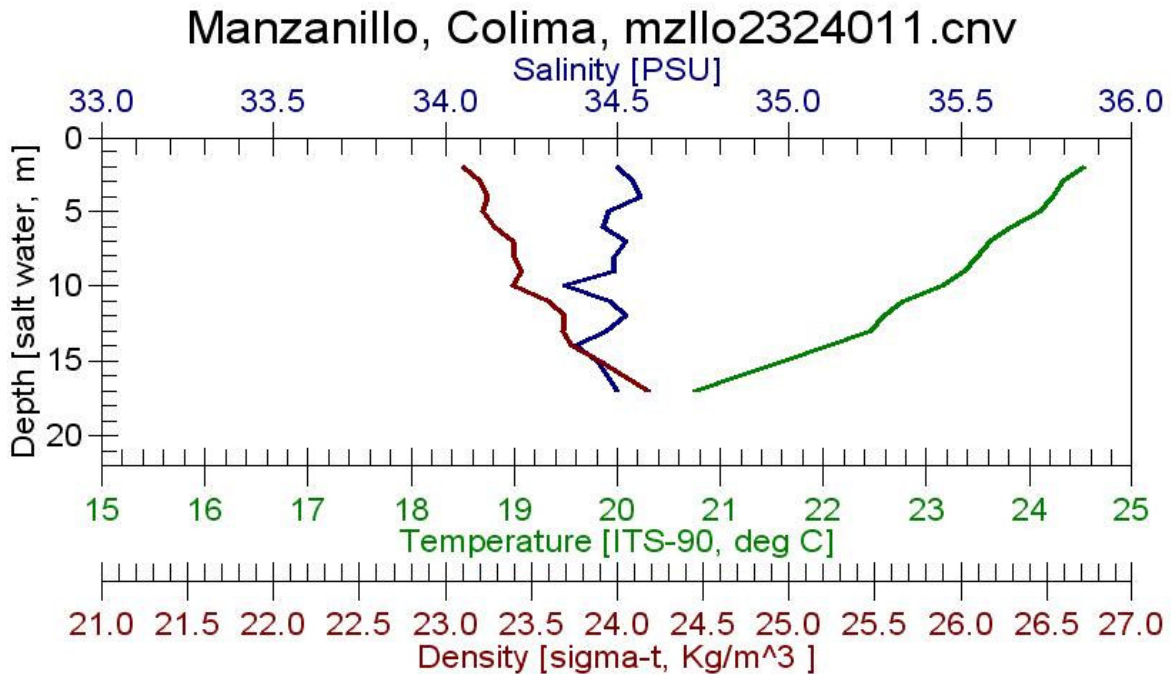


Figura 3.30 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 11.

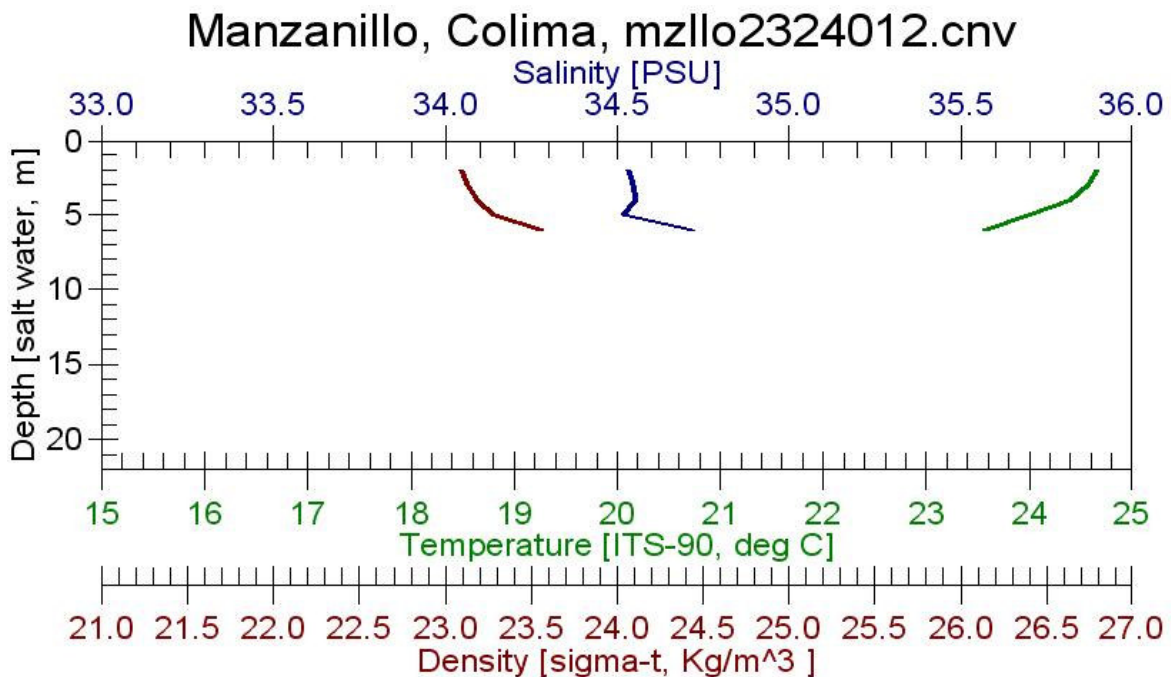


Figura 3.31 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 12.

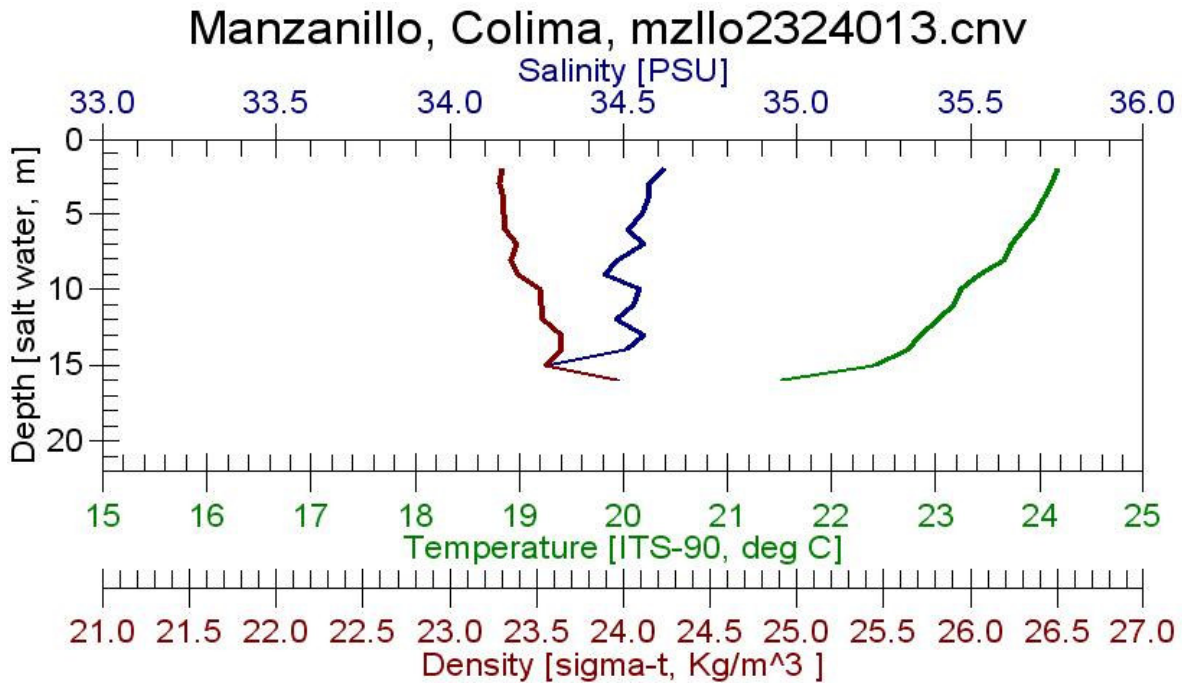


Figura 3.32 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 13.

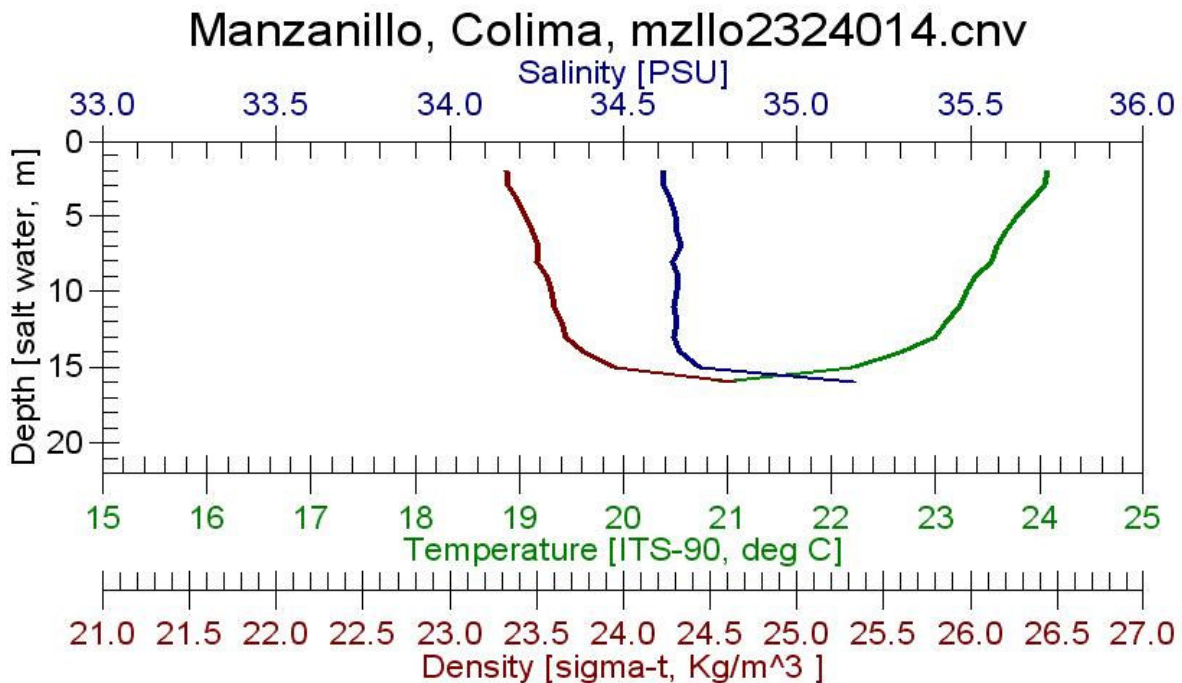


Figura 3.33 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 14.

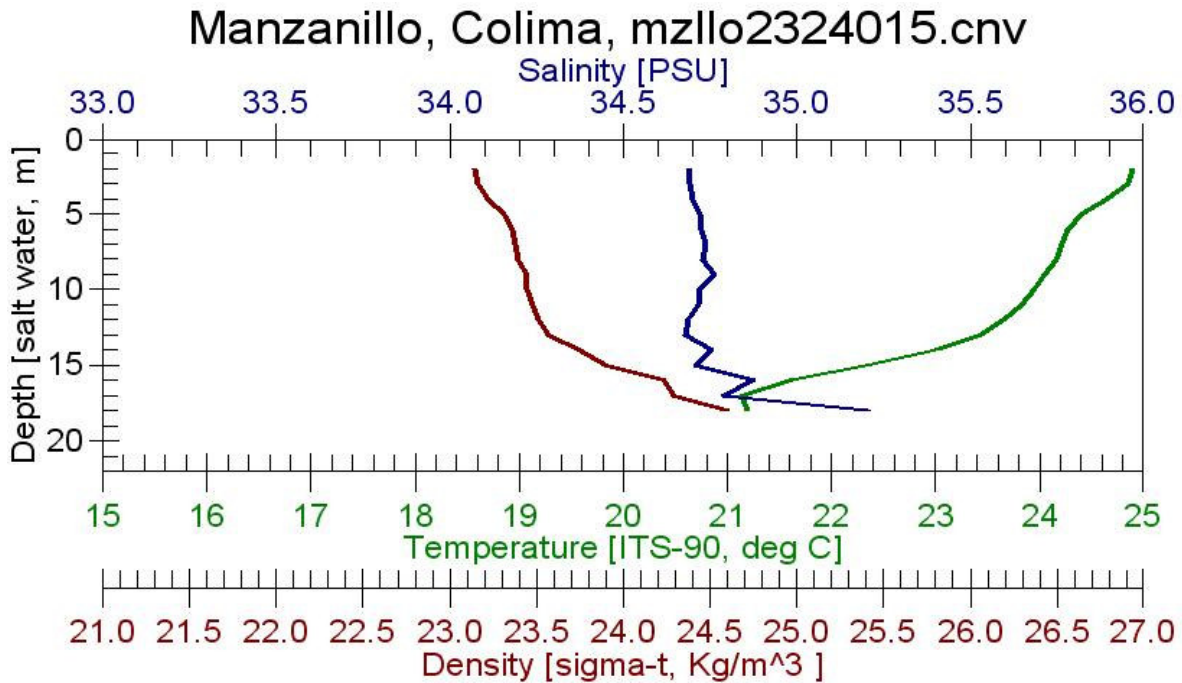


Figura 3.34 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 15.

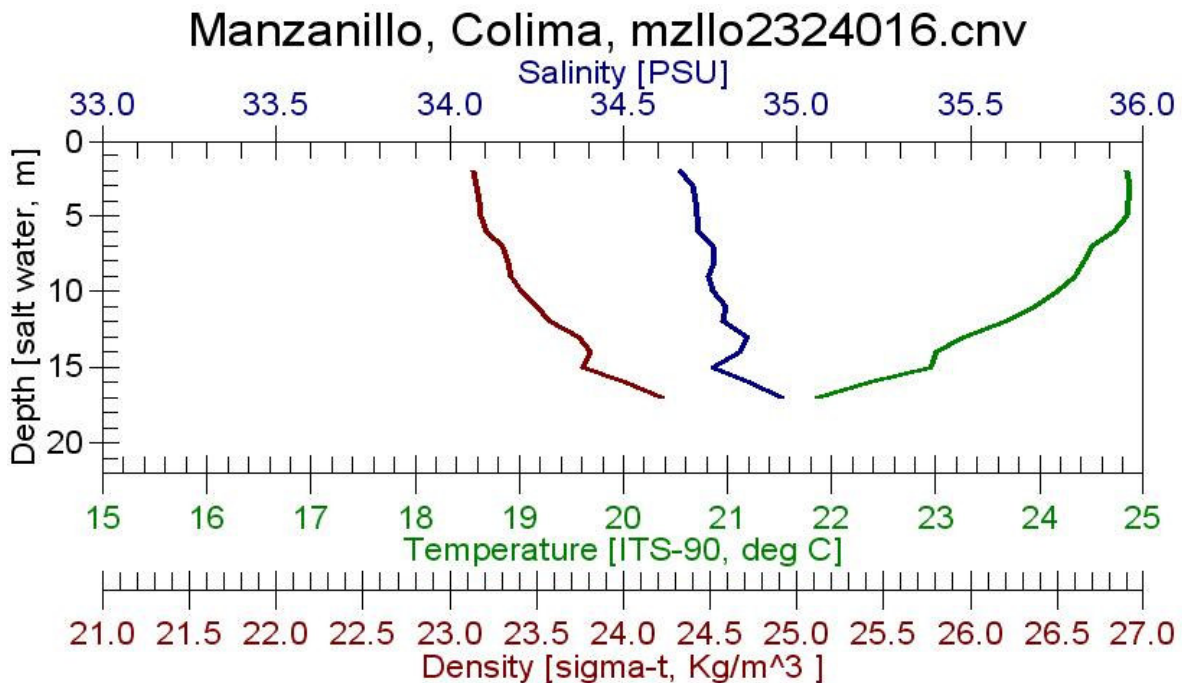


Figura 3.35 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 16.

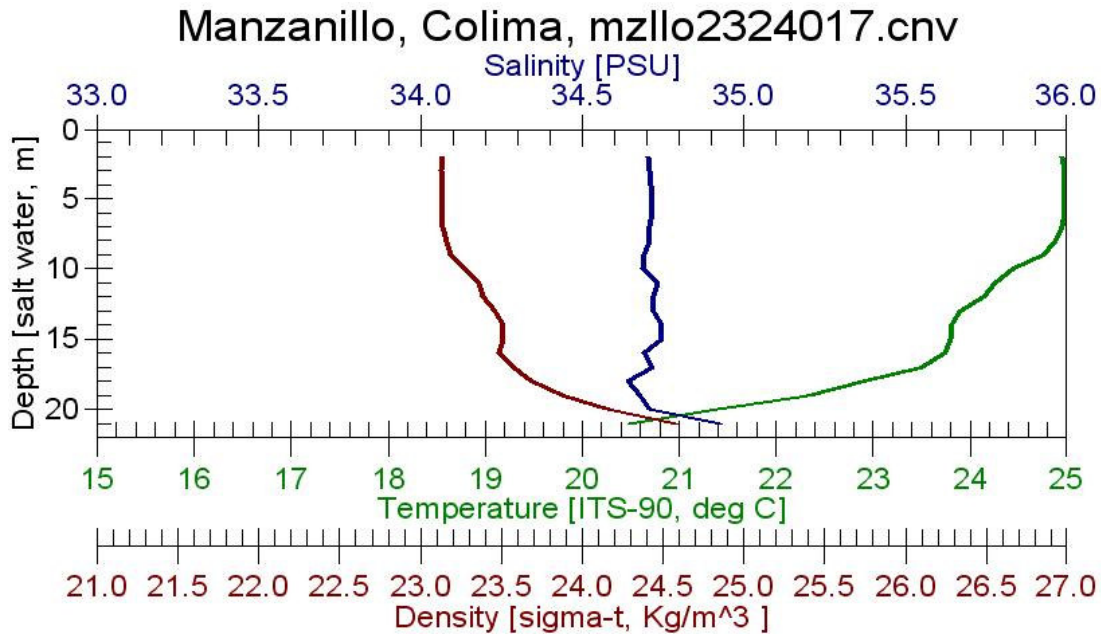


Figura 3.36 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 16.

Al tiempo de realizar los muestreos, la condición de marea progresaba de marea alta a baja, y la estructura del campo de masa estaba conformada en la vertical, por una capa superficial bien mezclada de aproximadamente 4 m de espesor y la temperatura descendía continuamente con profundidad. En la horizontal, un rasgo relevante, fue la presencia de las mismas diferencias significativas de temperatura a distintos niveles (figura 3.37).

La diferencia de la temperatura entre el agua de superficie y la fondo fue de 7 °C, de 2 °C entre el centro del canal y la de la escollera sur, y de 0.5 °C en superficie de ambas escolleras; el campo de masa de la sección muestreada indica la interacción de masas de aguas con propiedades diferentes y no hay mezcla.

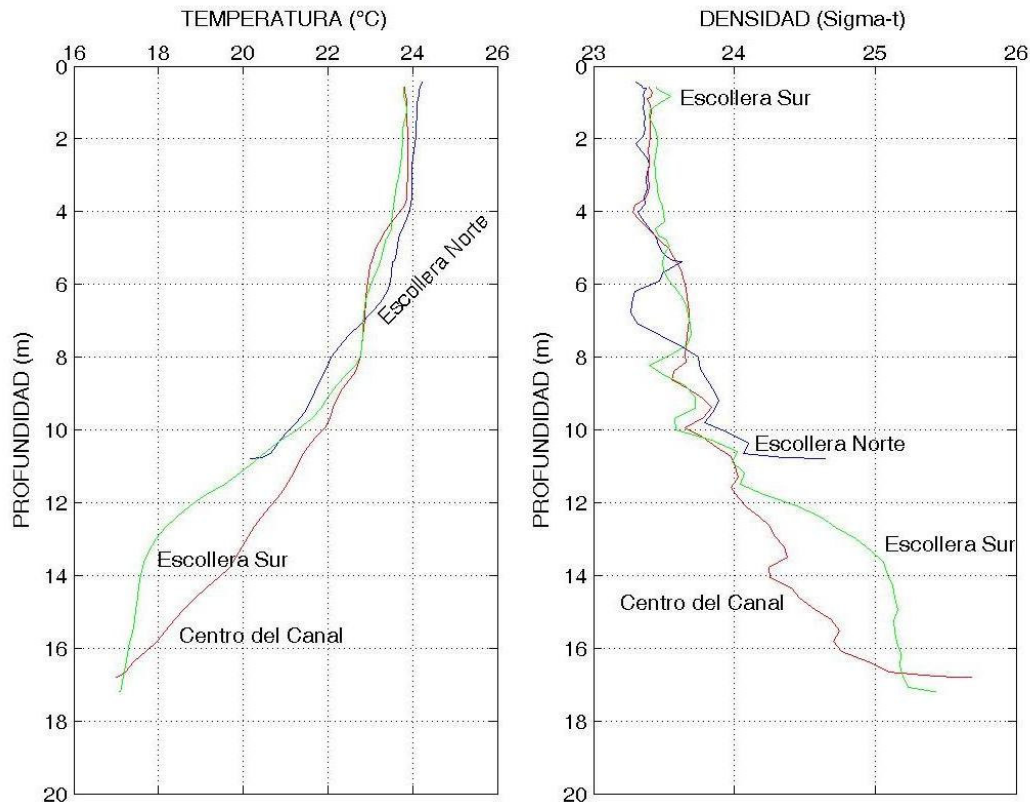


Figura 3.37 Mediciones de salinidad, temperatura y densidad en el punto 16.

4. Descripción del modelo

Para la modelación de la hidrodinámica del puerto de Manzanillo en su condición actual, así como también para su geometría de proyecto y su conexión con la Lagunas de las Garzas mediante un canal, 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). La ecuación de la GWCE y las de cantidad de movimiento en sentido x e y del modelo se muestran a continuación:

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

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. Modelación numérica

En este inciso se muestran los resultados obtenidos mediante el modelo ADCIRC-2DDI y están divididos en dos secciones, condiciones actuales y condiciones de proyecto. En ambas secciones se generaron resultados hidrodinámicos durante mareas vivas y mareas muertas. El dominio para la simulación de la hidrodinámica es un semicírculo con un radio de 135 km con centro en la boca de entrada de las bahías de Manzanillo y Santiago. Este dominio se discretizó con una malla triangular no estructurada (figura 5.1), el número de nodos y elementos de la discretización para condiciones actuales y de proyecto, se describen en los apartados 5.1 y 5.2, respectivamente.

5.1 Simulación numérica bajo condiciones actuales

Para condiciones actuales, la malla generada fue de 39420 elementos y 20841 nodos, con un tamaño de elemento dentro del puerto de 15 m. La vista global de la malla puede observarse en la figura 5.1. Las figura 5.2 y figura 5.3, muestran el detalle de la malla en las bahías de Manzanillo y Santiago, así como el detalle en el canal de navegación del puerto, respectivamente.

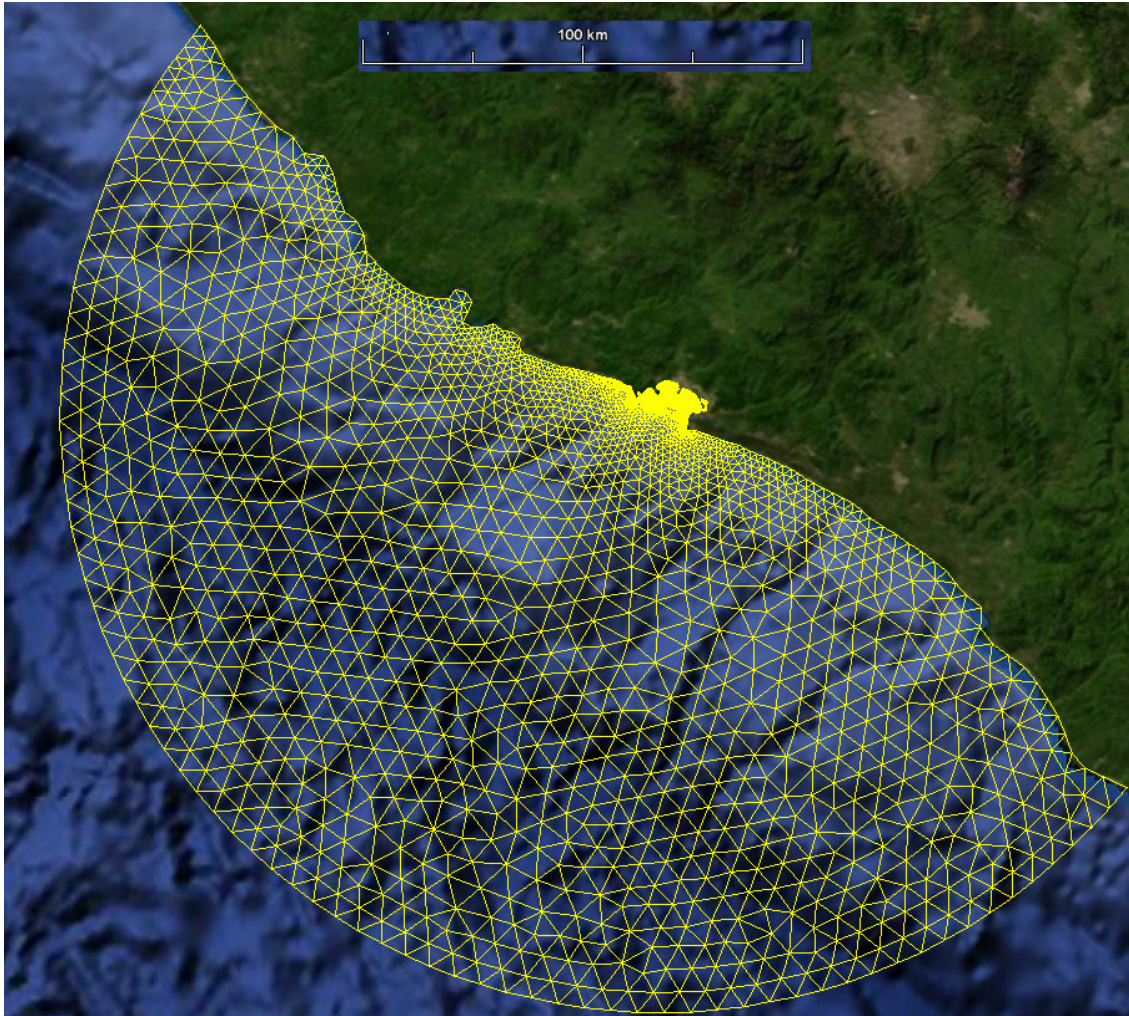


Figura 5.1 Vista global de la discretización de dominio de cálculo.

La simulación comprende un periodo de 35 días, con inicio el día 3 de abril de 2009 a las 00:00 h. Los resultados analizados se muestran después del quinto día de simulación. La figura 5.4 muestra la señal de marea obtenida en la bocana del puerto durante el periodo de modelación de resultados.

Para validar la modelación numérica, se hizo una comparación entre los resultados de la simulación y los datos obtenidos del ADCP que se ancló cerca de la boya 8 en el canal de

navegación del puerto. Puede observarse que los niveles simulados tienen correspondencia con los niveles medidos tanto en amplitud como en fase (figura 5.5). Por otra parte, la magnitud de la velocidad promediada en la vertical presenta algunas variaciones, sin embargo, el orden de magnitud es aceptable (figura 5.6). Es importante señalar que en esta modelación se considera una condición barotrópica, y de acuerdo con las mediciones realizadas en campo, la condición es baroclínica, por lo que se debe tener cuidado al interpretar las velocidades derivadas de las simulaciones numéricas o cualquier otra bidimensional o tridimensional en donde no se consideren los gradientes de densidad.



Figura 5.2 Detalle de la malla de las bahías.



Figura 5.3 Detalle de la malla en el puerto de Manzanillo.

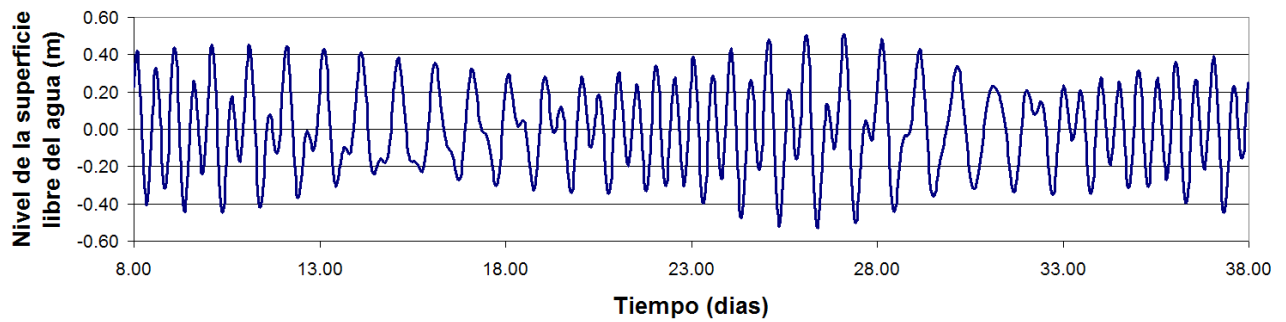


Figura 5.4 Señal de marea simulada en la bocana del puerto.

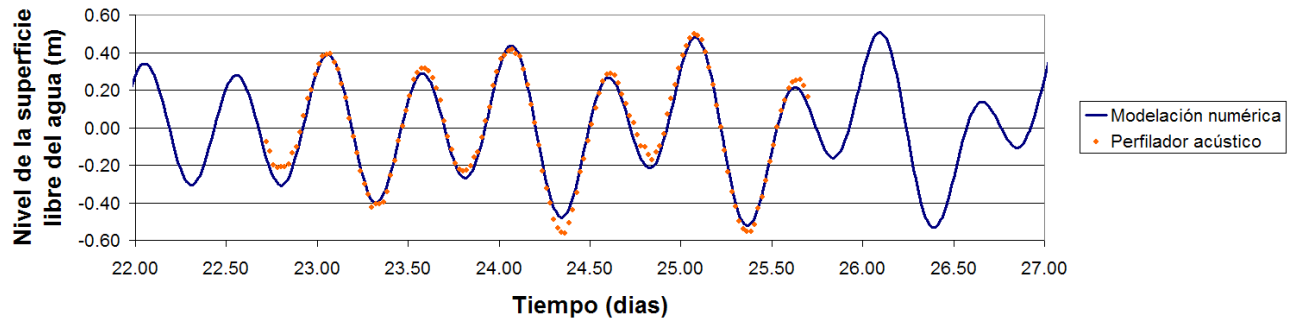


Figura 5.5 Comparación de los niveles de la superficie libre, medidos y simulados.

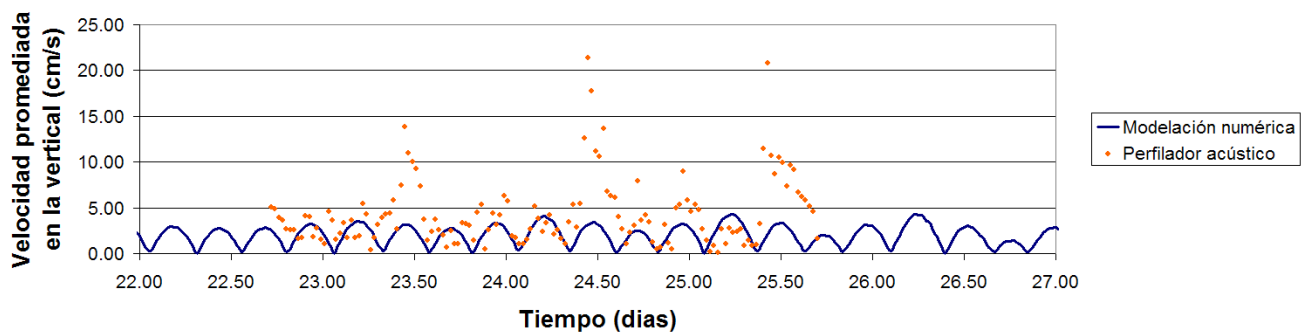


Figura 5.6 Comparación de la velocidad promediada en la vertical, medida y simulada.

a) *Mareas vivas*

El periodo de mareas vivas considerado en esta simulación, comprende del 23 al 28 de abril de 2009. De la figura 5.7 a la figura 5.10 se muestra el campo de la elevación de la superficie libre del mar para todo el dominio simulado. Puede observarse que existen gradientes máximos del nivel de la superficie libre de hasta 30 cm a lo largo del dominio de cálculo considerado.

Para describir la hidrodinámica en el interior del puerto en condiciones actuales, se presentan diez pares de imágenes (figura 5.11 a figura 5.30), y en cada par pueden observarse tanto la elevación de la superficie libre del agua con respecto al nivel medio del mar (NMM), así como también el respectivo campo de velocidad para ese tiempo.

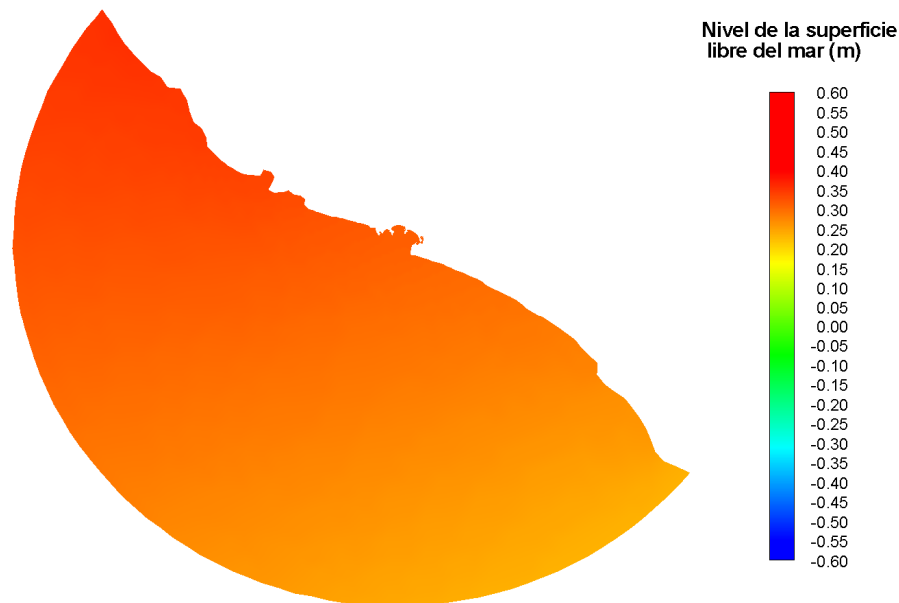


Figura 5.7 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 23 abril 2009, 00:00 h



Figura 5.8 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 23 abril 2009, 08:00 h

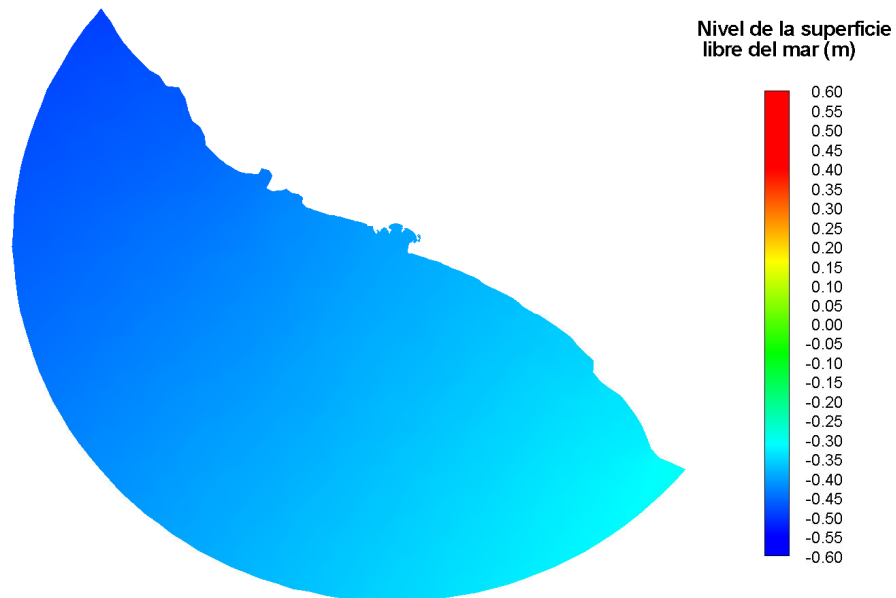


Figura 5.9 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 23 abril 2009, 12:00 h



Figura 5.10 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 24 abril 2009, 16:00 h

En el periodo de mareas vivas, los niveles máximos y mínimos de la superficie libre el mar tuvieron valores de 0.45 y -0.5 m (NMM), respectivamente. Puede observarse que las zonas con mayor dinámica son el canal de acceso y la parte norte del puerto. En el canal de acceso, las velocidades integradas en la vertical alcanzaron los 3 cm/s en condiciones de flujo y hasta los 5 cm/s en condiciones de reflujó. En la parte norte del puerto, las velocidades alcanzaron valores del orden de los 3.5 cm/s para las condiciones de flujo y 4.5 cm/s para condiciones de reflujó. Para las condiciones actuales, puede observarse que la onda de marea no presenta un amortiguamiento significativo en el interior del puerto.

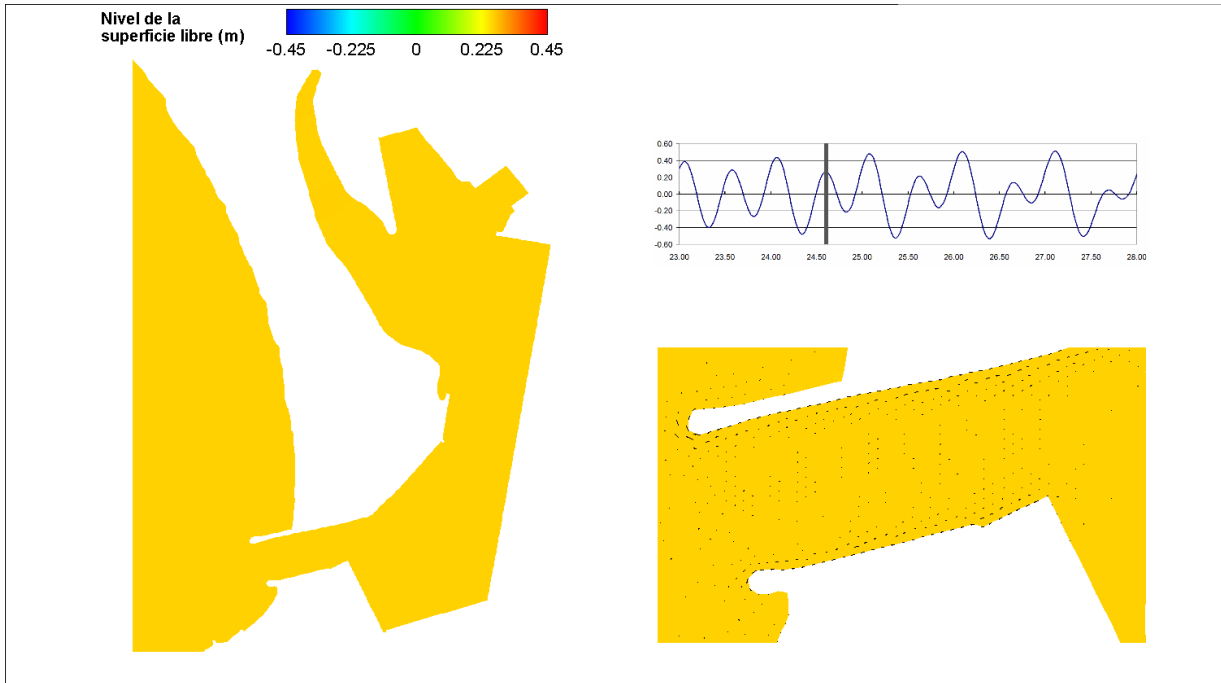


Figura 5.11 Elevación de la superficie libre en el puerto. 24 abril 2009, 14:30 h

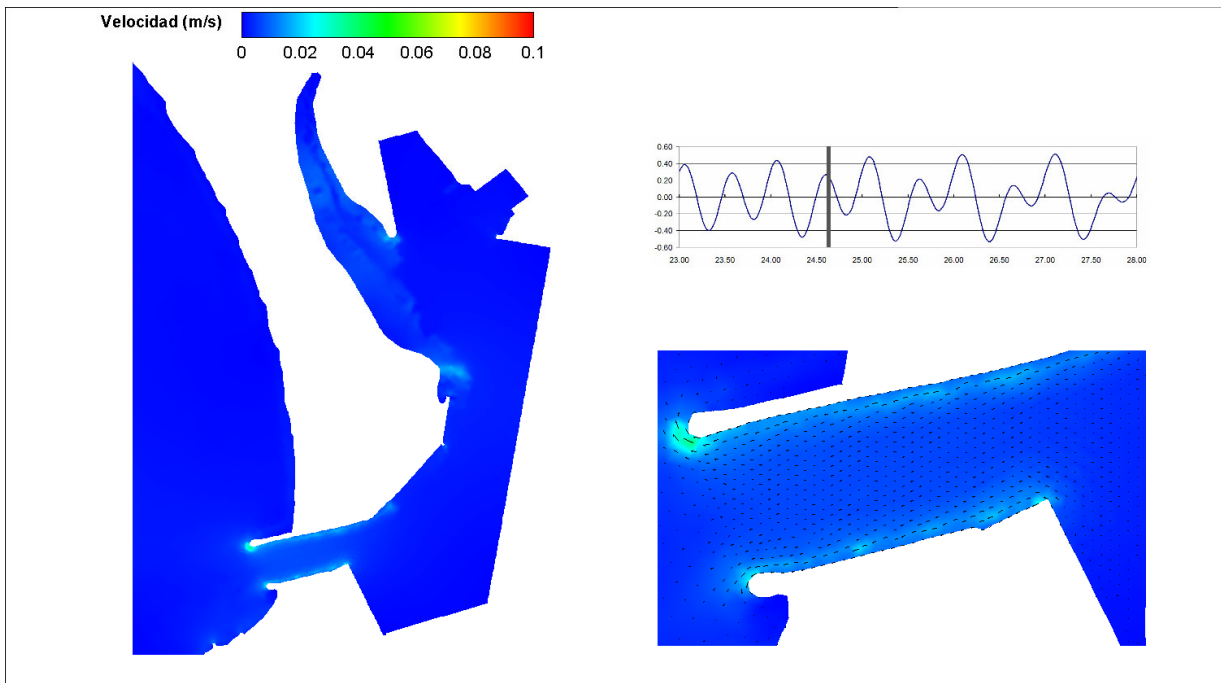


Figura 5.12 Campo de velocidades. 24 abril 2009, 14:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

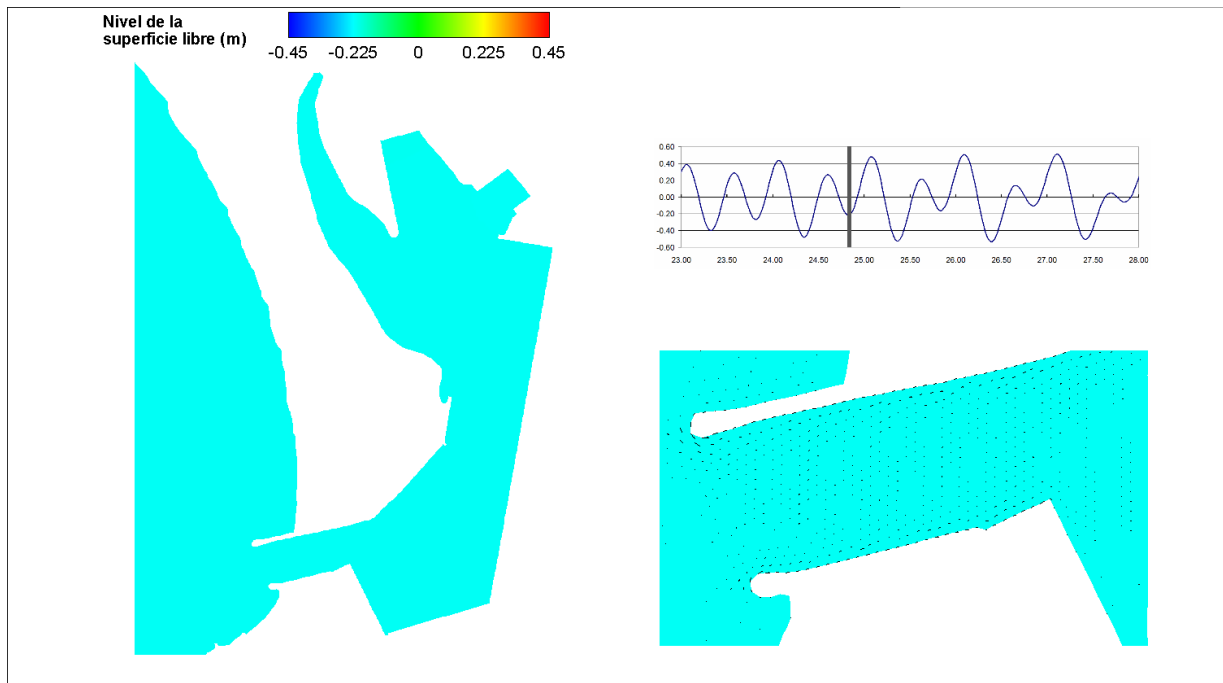


Figura 5.13 Elevación de la superficie libre en el puerto. 24 abril 2009, 20:00 h

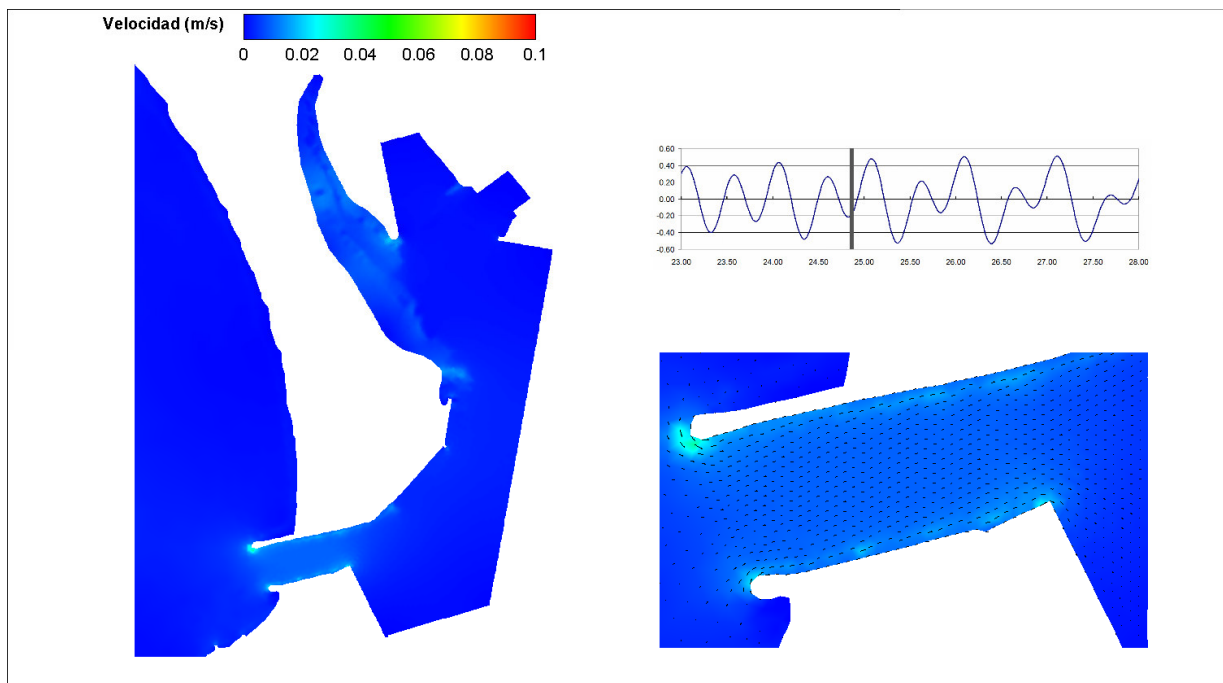


Figura 5.14 Campo de velocidades. 24 abril 2009, 20:00 h

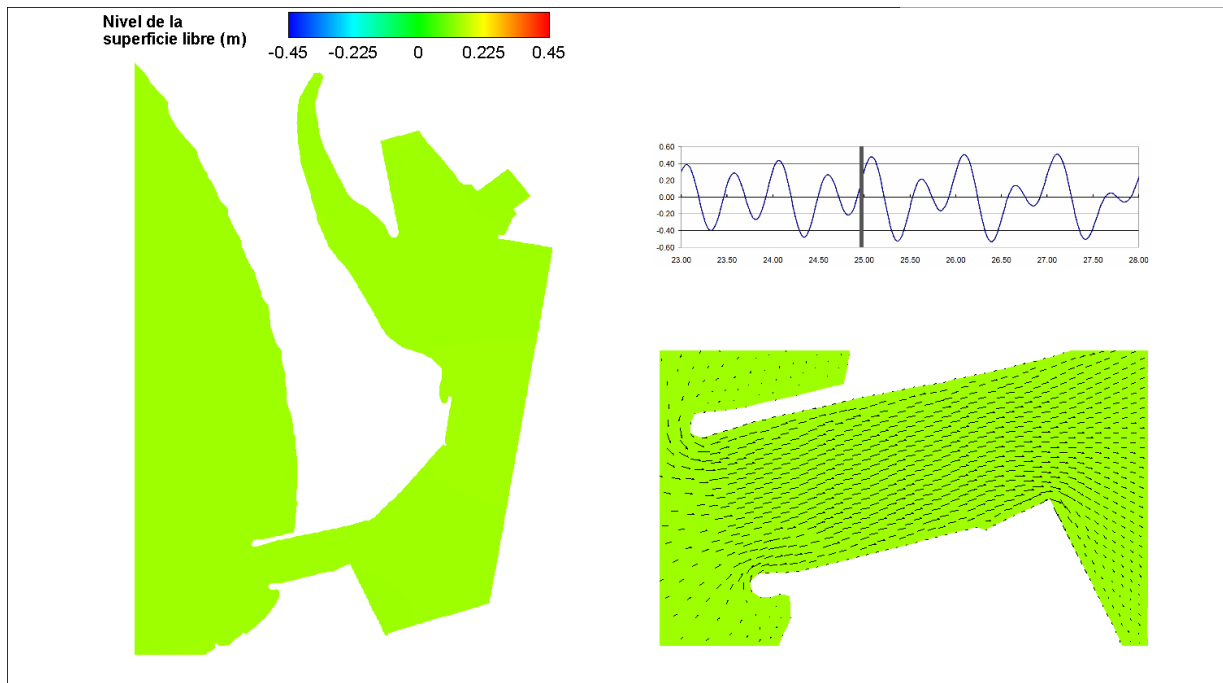


Figura 5.15 Elevación de la superficie libre en el puerto. 24 abril 2009, 23:00 h

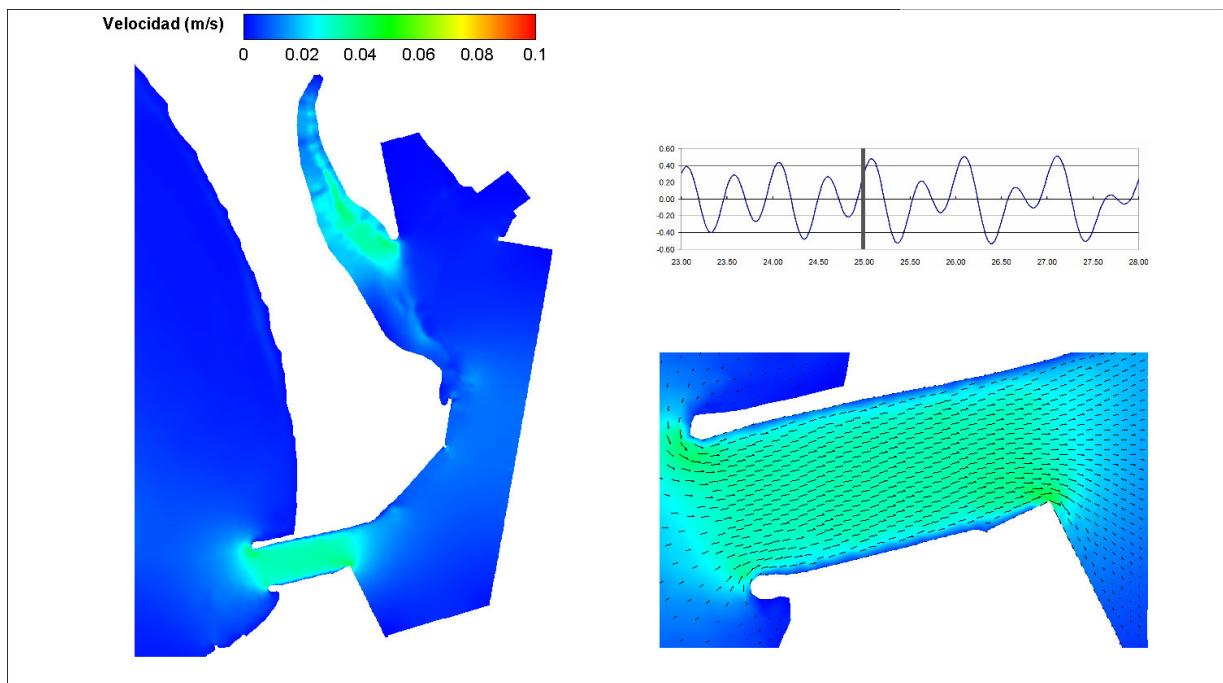


Figura 5.16 Campo de velocidades. 24 abril 2009, 23:00 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

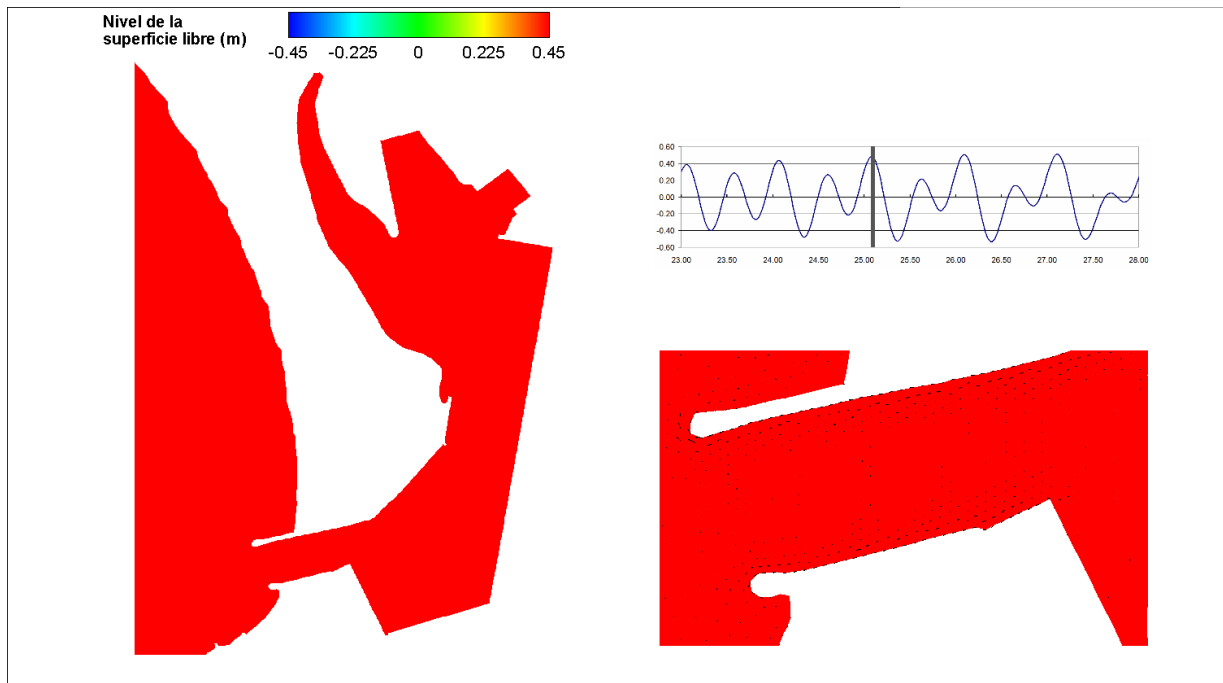


Figura 5.17 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 02:00 h

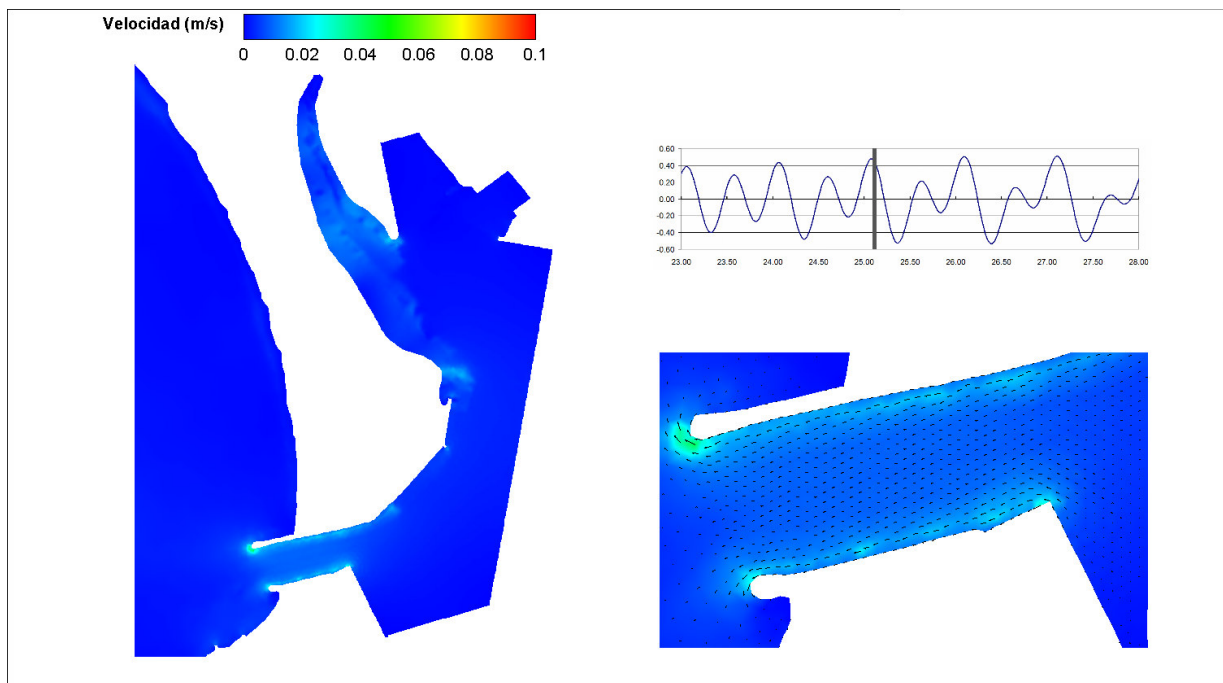


Figura 5.18 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 02:00 h

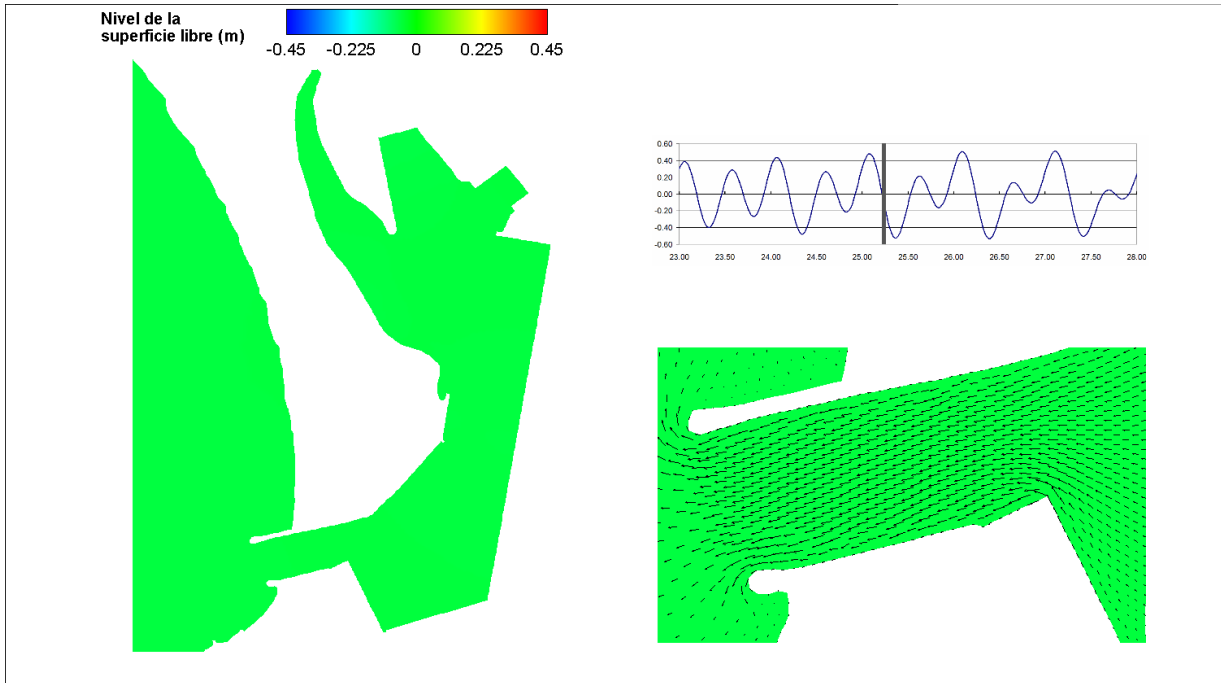


Figura 5.19 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 05:30 h

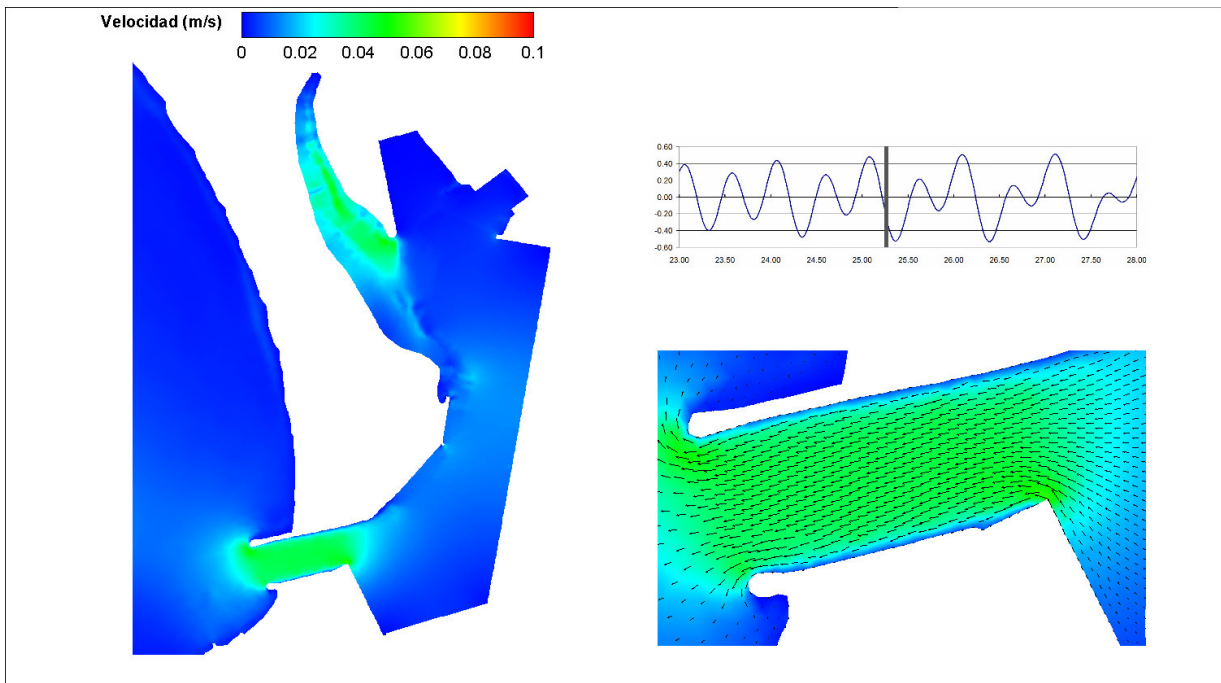


Figura 5.20 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 05:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

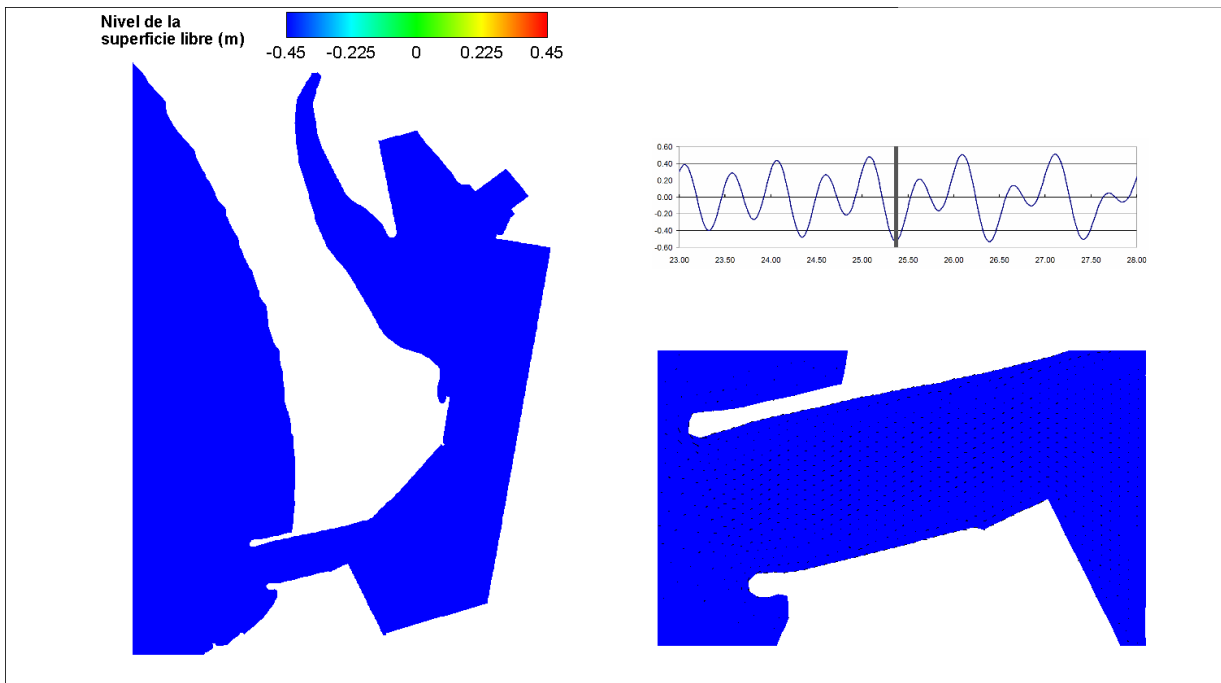


Figura 5.21 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 08:30 h

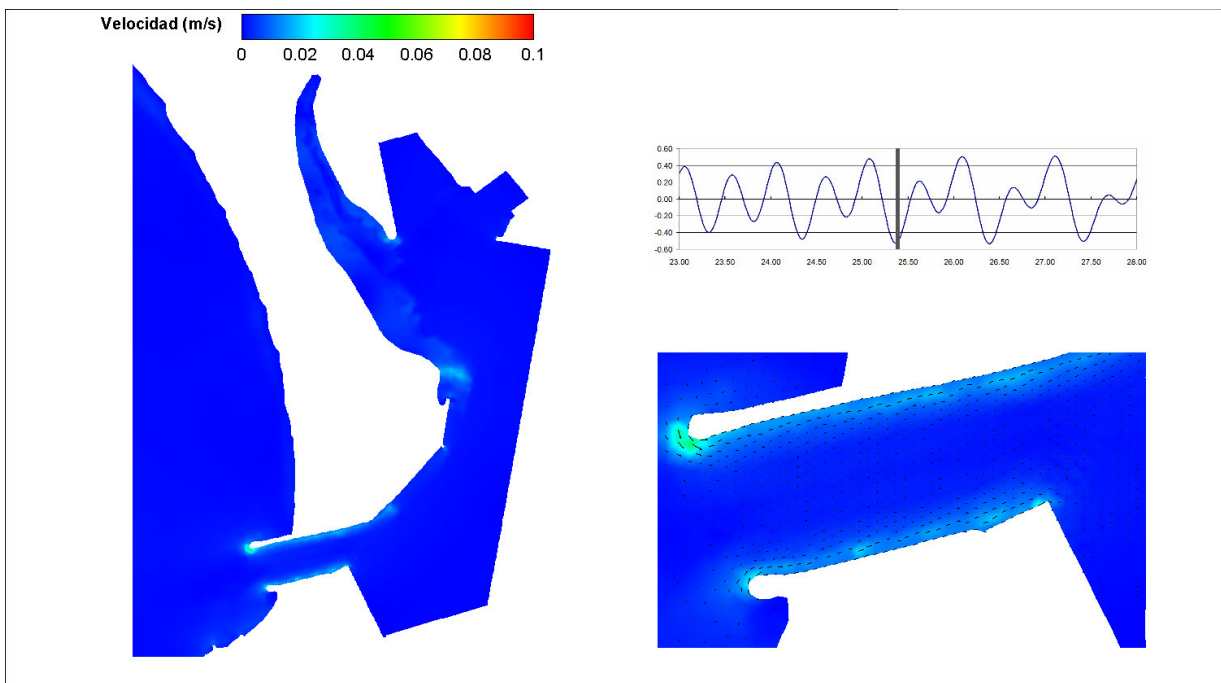


Figura 5.22 Campo de velocidades. 25/ABR/2009 08:30 hr.

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

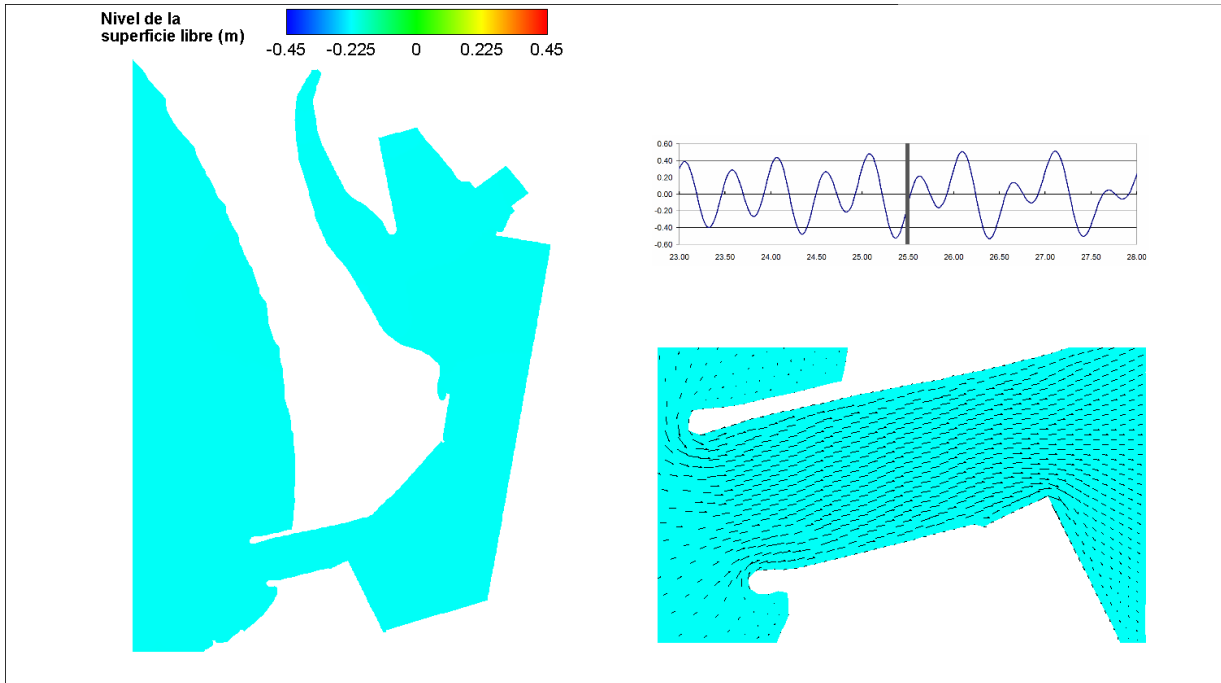


Figura 5.23 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 11:30 h

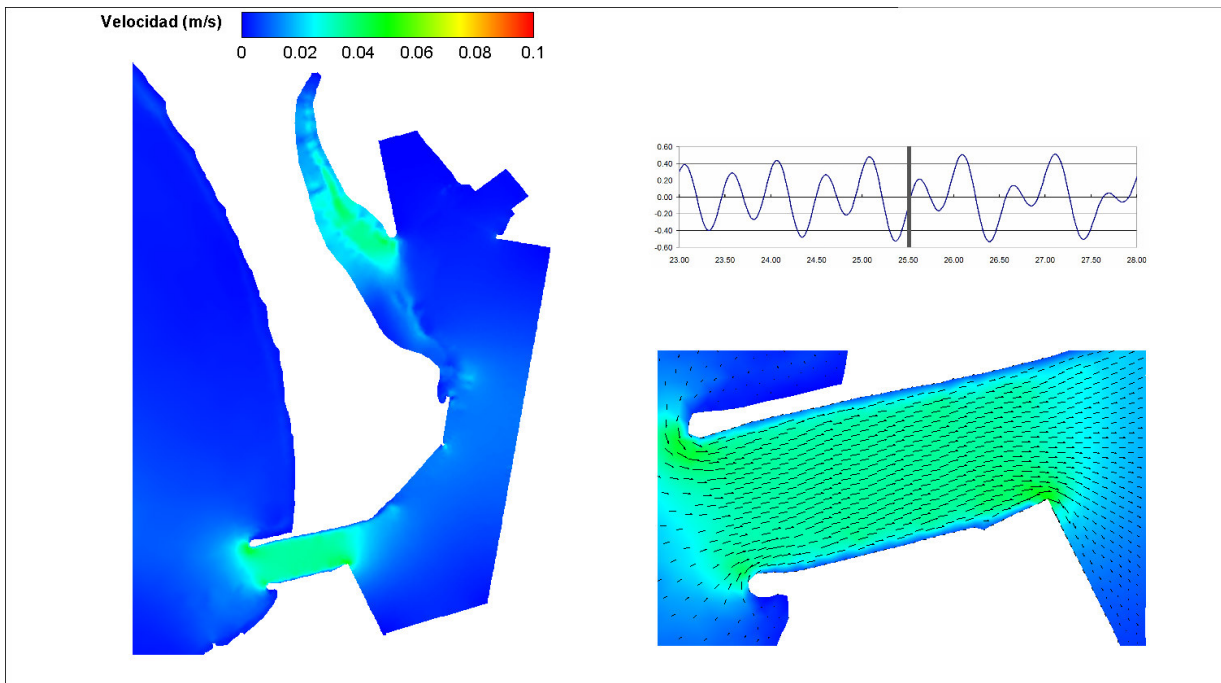


Figura 5.24 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 11:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

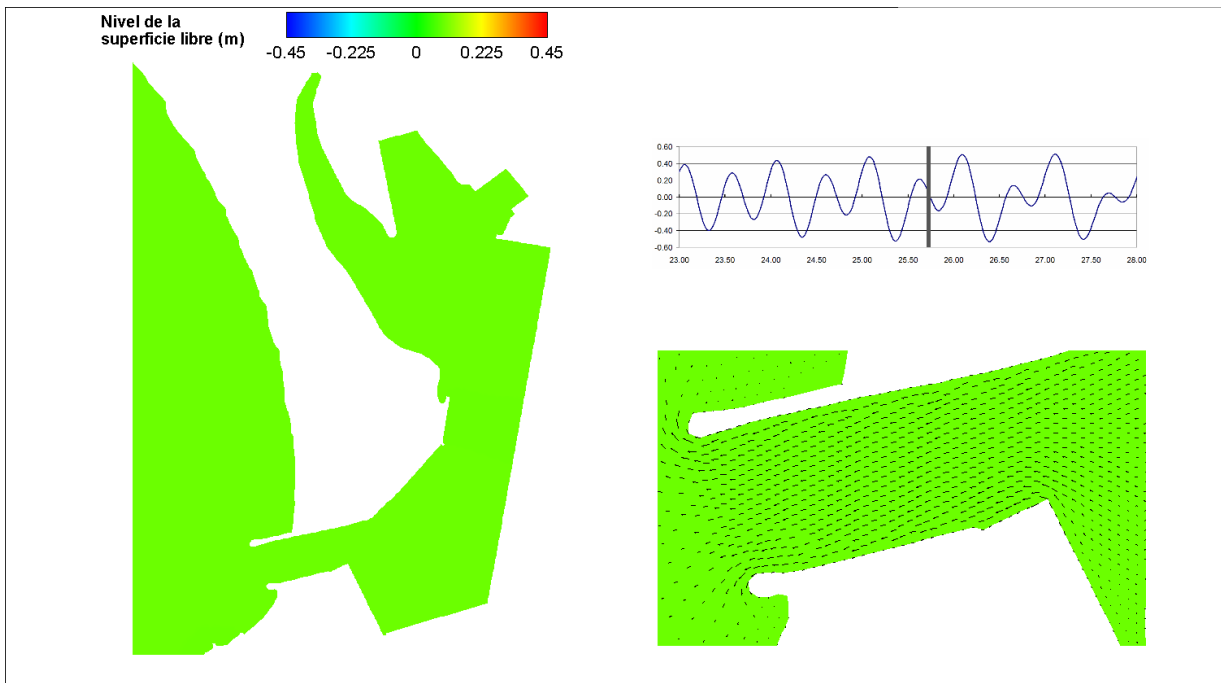


Figura 5.25 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 17:00 h

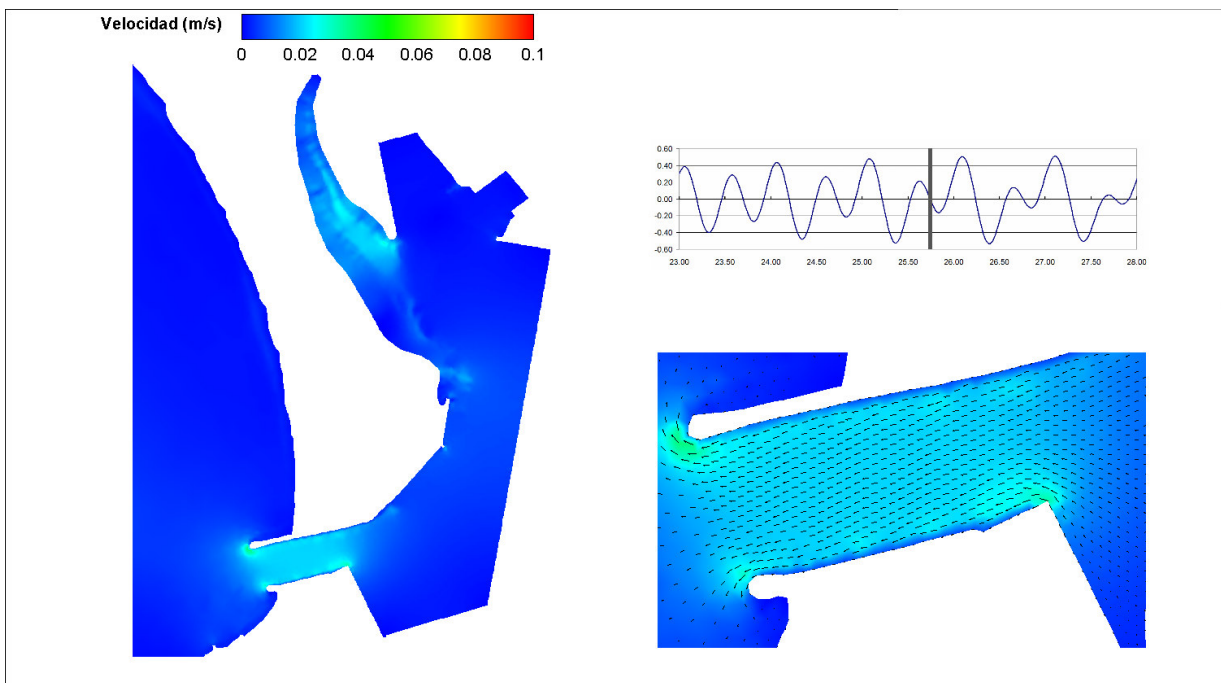


Figura 5.26 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 17:00 h

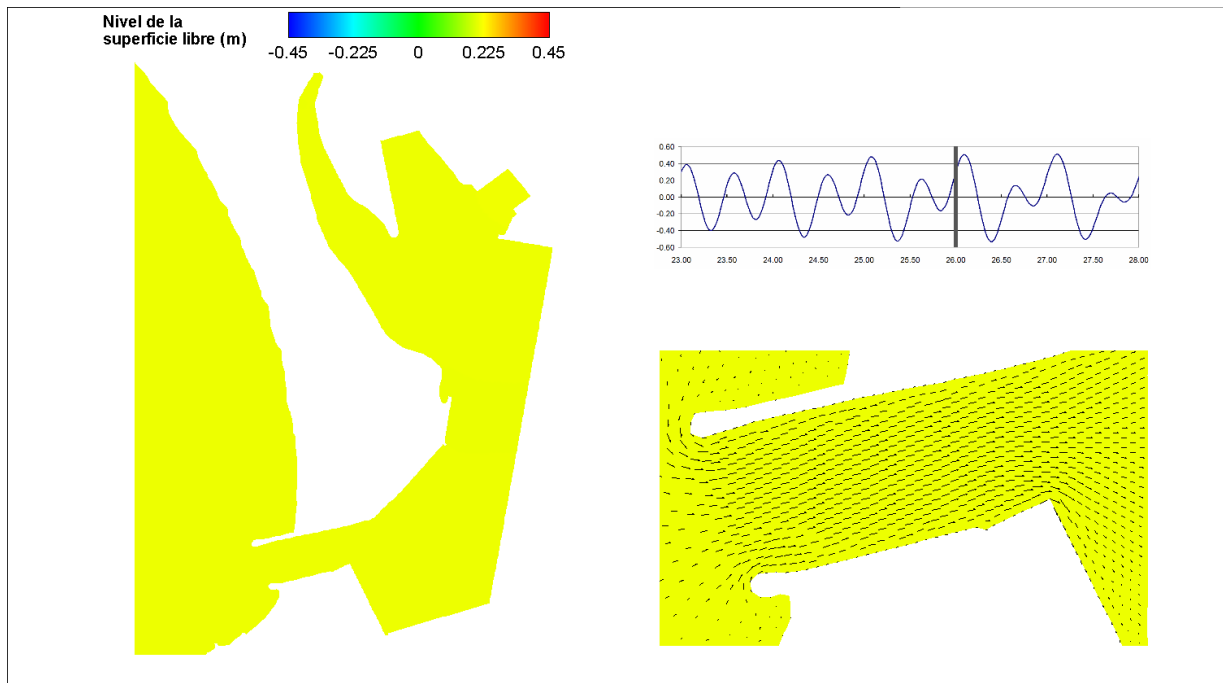


Figura 5.27 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 23:30 h

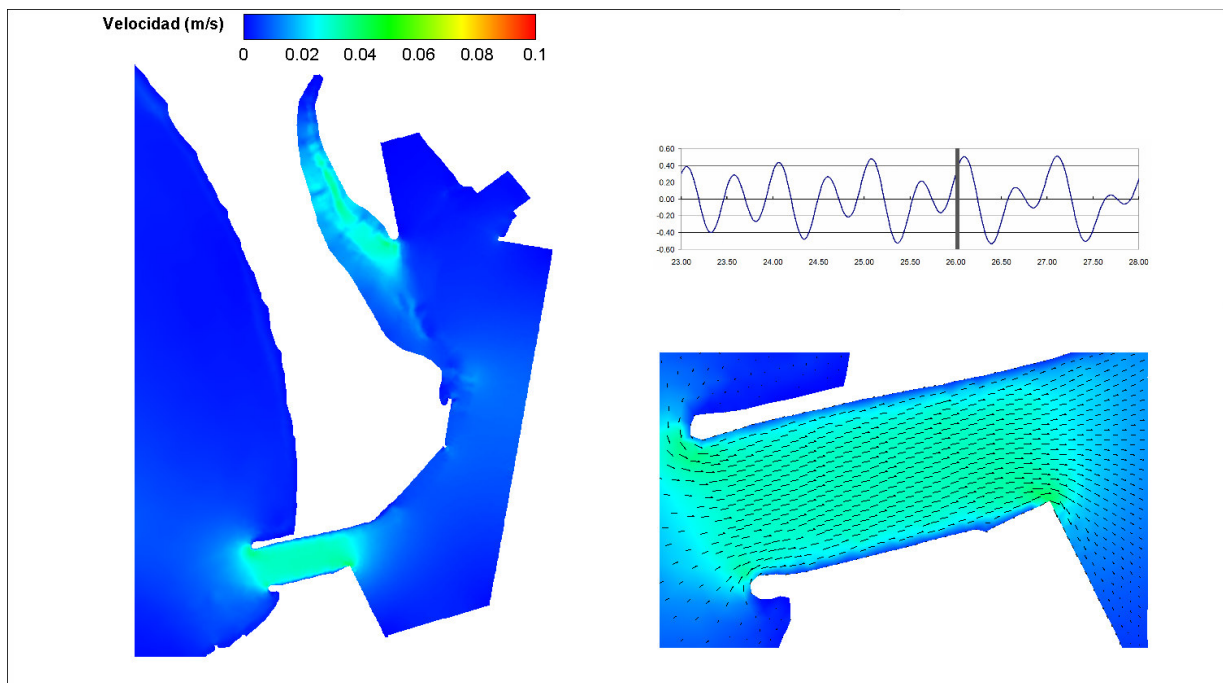


Figura 5.28 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 23:30 h

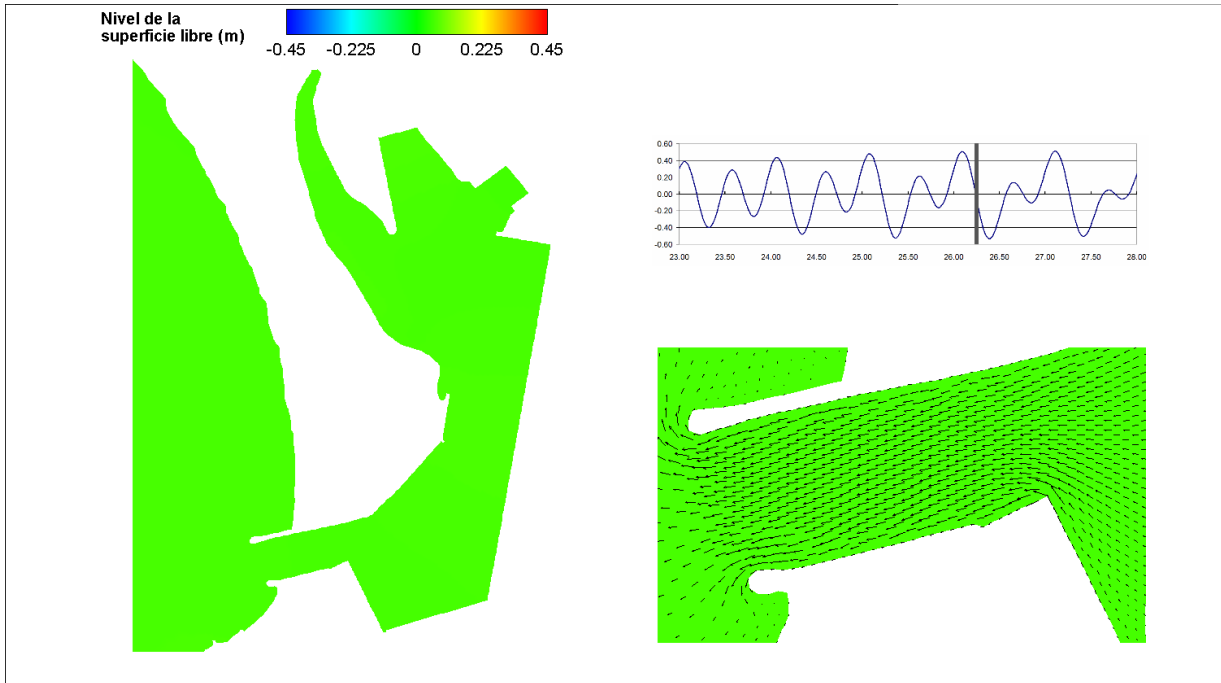


Figura 5.29 Elevación de la superficie libre en el puerto. 26 abril 2009, 05:30 h

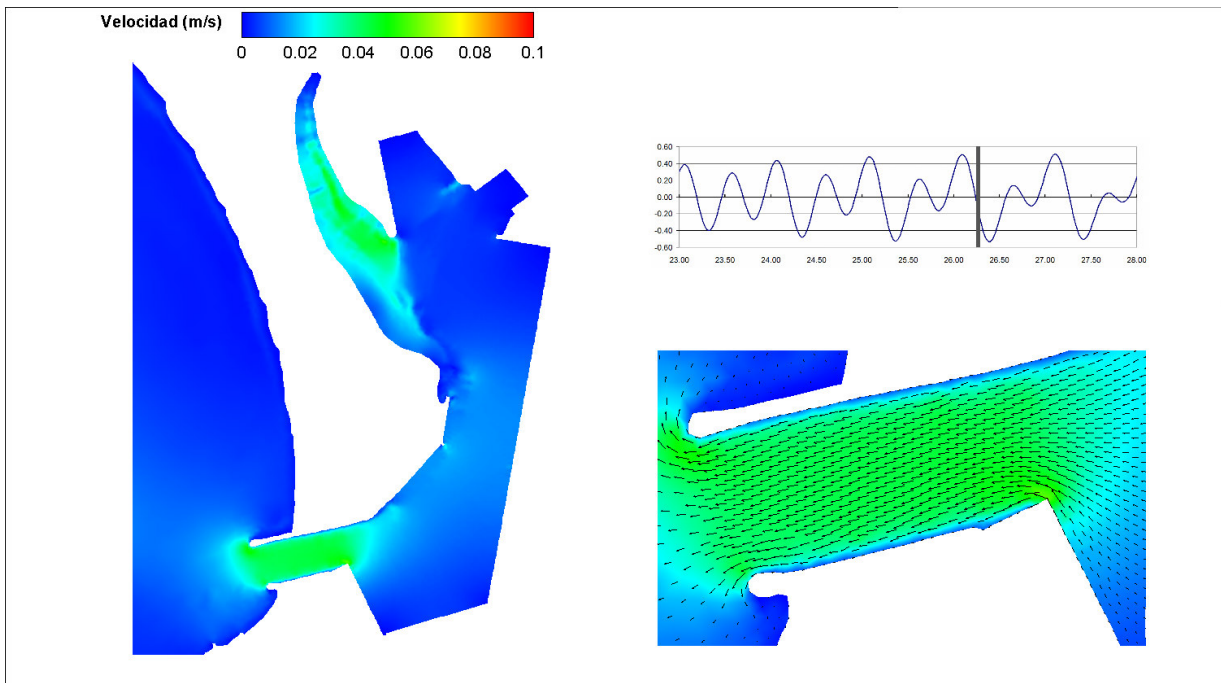


Figura 5.30 Campo de velocidades. 26 abril 2009, 05:30 h

b) *Mareas muertas*

El periodo de mareas muertas considerado, comprende del 30 de abril al 5 de mayo de 2009. De la figura 5.31 a figura 5.34 se muestra el campo de elevaciones de la superficie libre en el dominio de cálculo, y pueden observarse gradientes de hasta de 25 cm a lo largo del dominio de cálculo.

Las condiciones hidrodinámicas en el interior del puerto bajo condiciones actuales, se muestran en diez pares de imágenes (figura 5.35 a figura 5.54), y en cada par se presenta el campo de elevación de la superficie libre, y el campo de velocidades en un tiempo determinado.

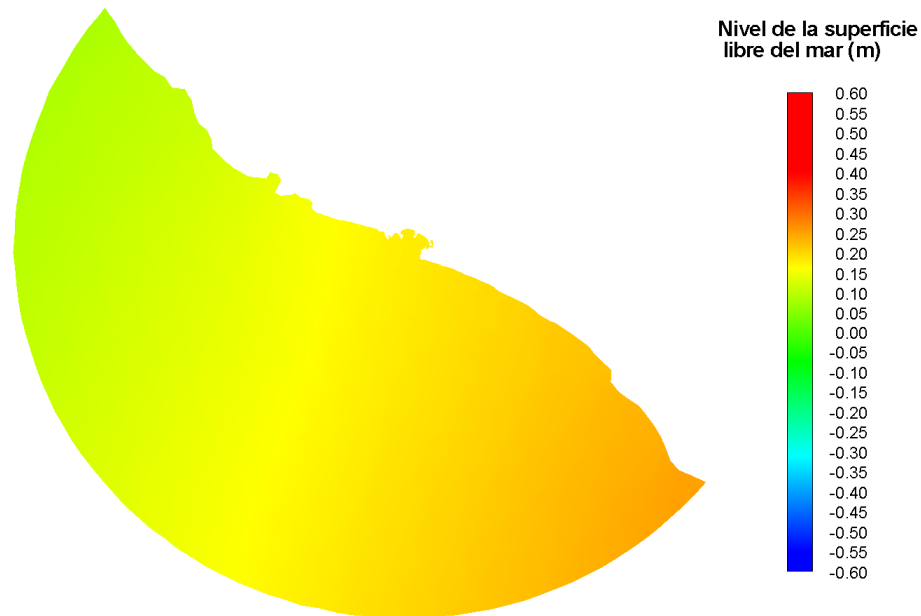


Figura 5.31 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 30 abril 2009, 04:00 h

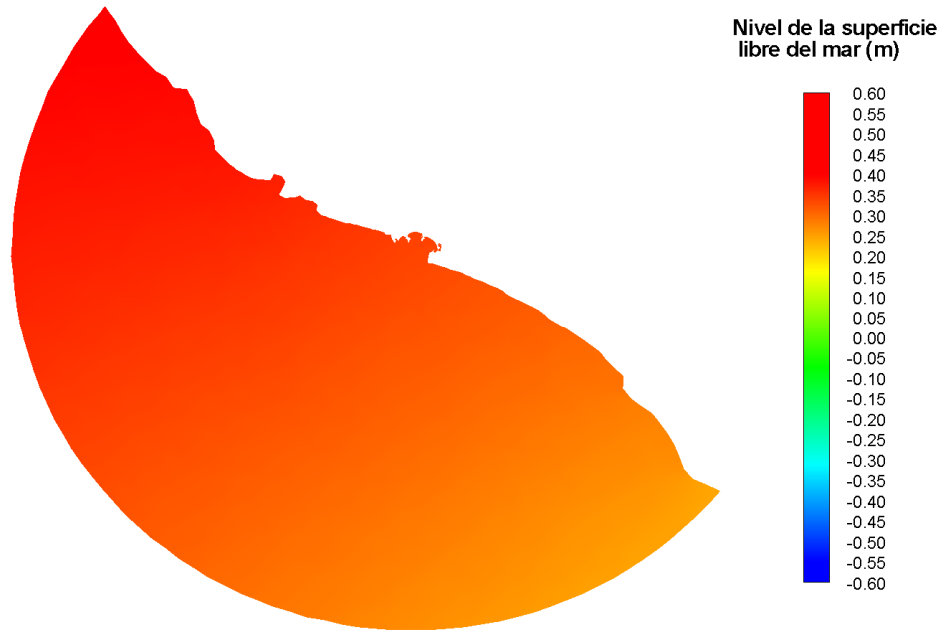


Figura 5.32 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 30 abril 2009, 08:00 h

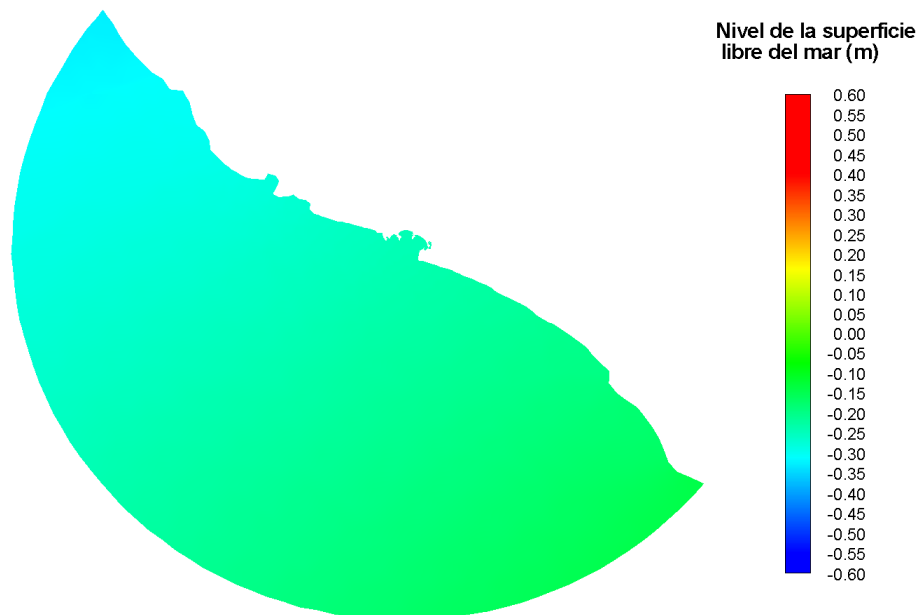


Figura 5.33 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 30 abril 2009, 16:00 h

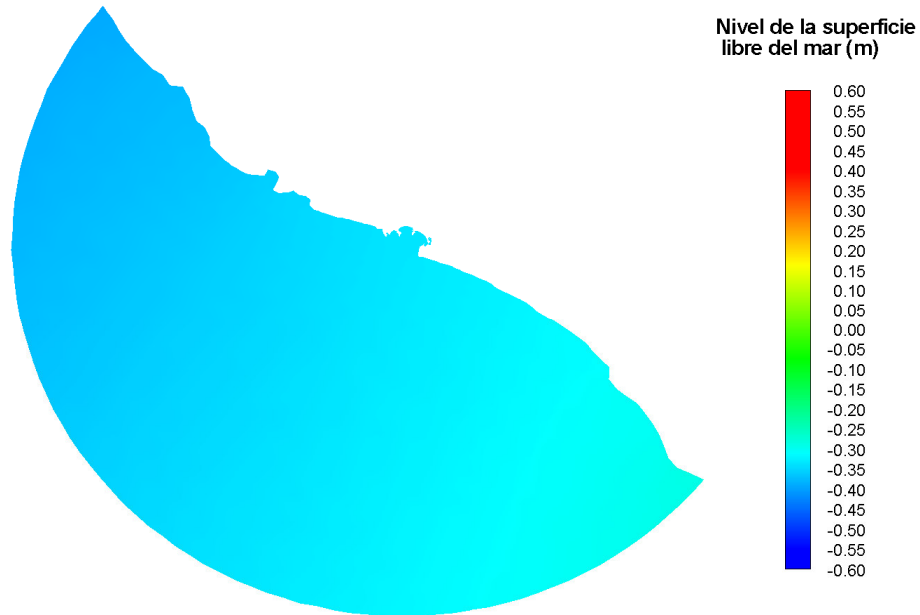


Figura 5.34 Elevación de la superficie libre en todo el dominio. 1 mayo 2009, 20:00 h

En el periodo de mareas muertas, la elevación de la superficie libre tuvo valores máximos y mínimos de 0.34 y -0.35 m, respectivamente. Las zonas en donde se presentaron las velocidades máximas fueron: el canal de acceso del puerto y en el norte del puerto en la zona de manglares. En el canal de acceso, las velocidades máximas alcanzadas fueron de 2 cm/s en condiciones de flujo y de 1.8 cm/s en condiciones de reflujó. En la zona norte del puerto las velocidades máximas fueron de 2.2 cm/s en condiciones de flujo y de 2 cm/s en reflujó.

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

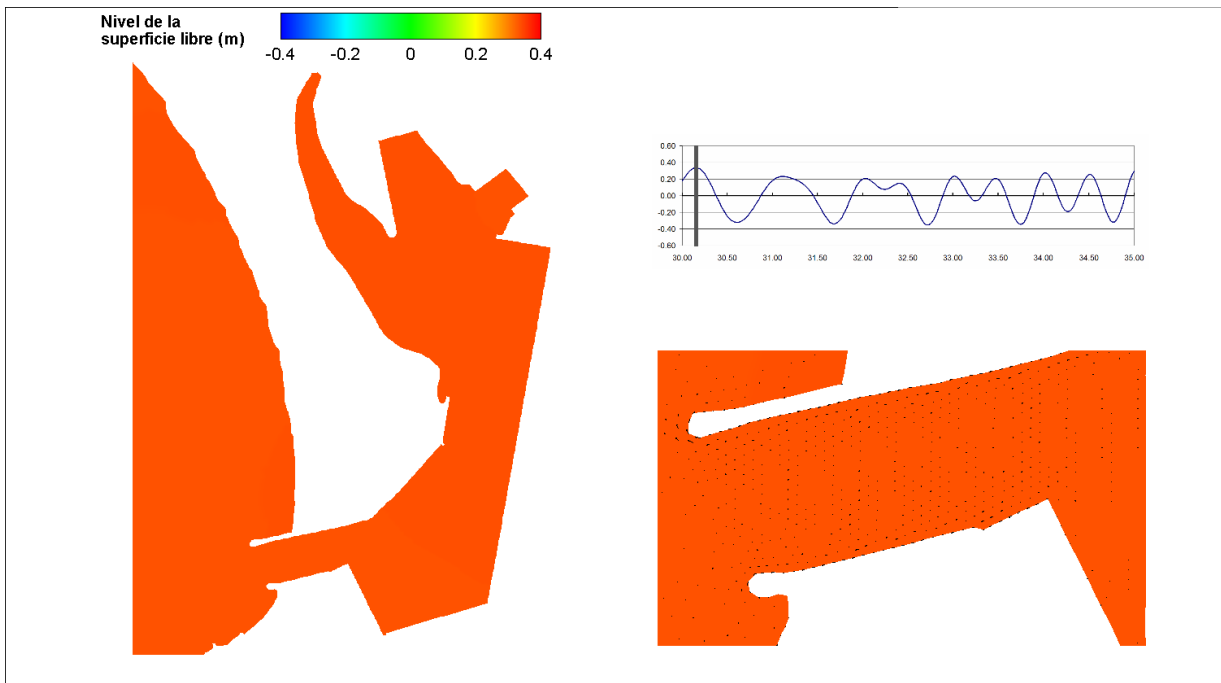


Figura 5.35 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 04:30 h

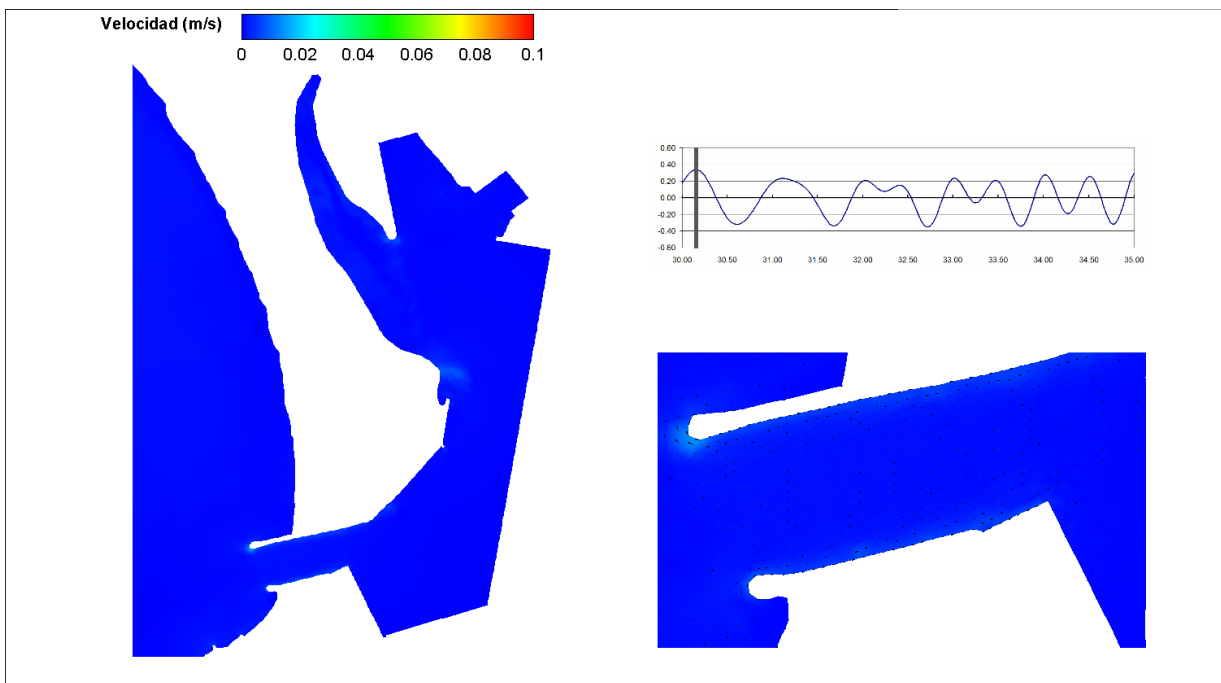


Figura 5.36 Campo de elevaciones. 30 abril 2009, 04:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

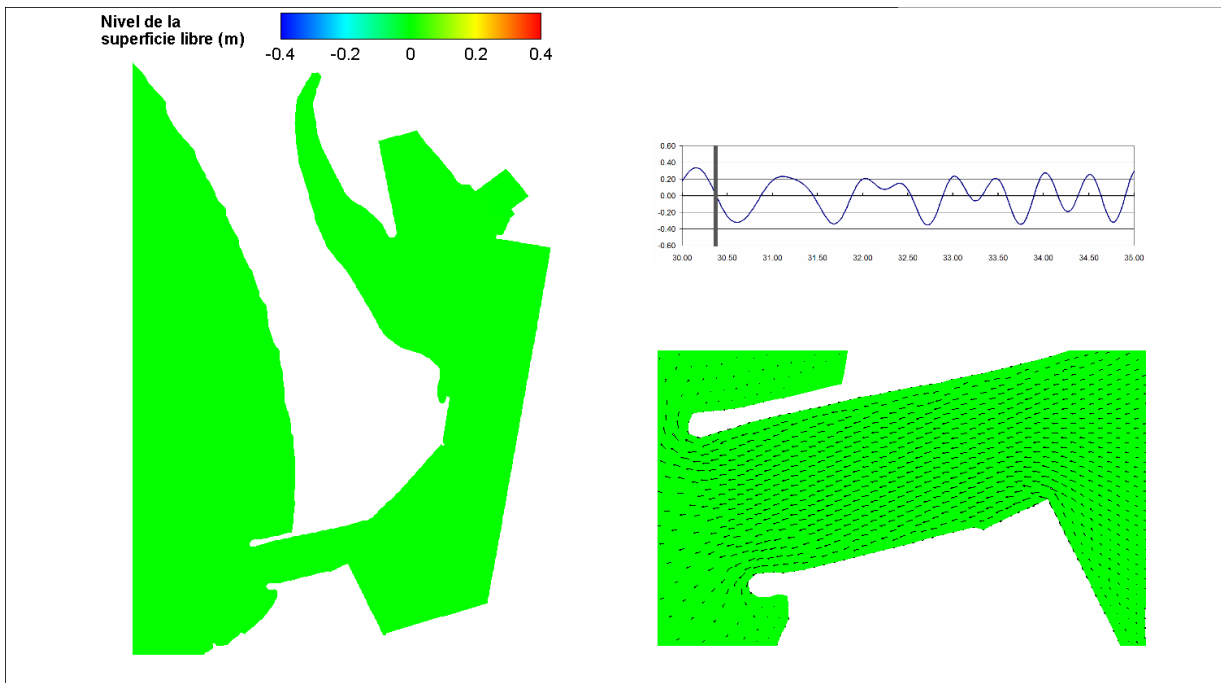


Figura 5.37 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 09:00 h

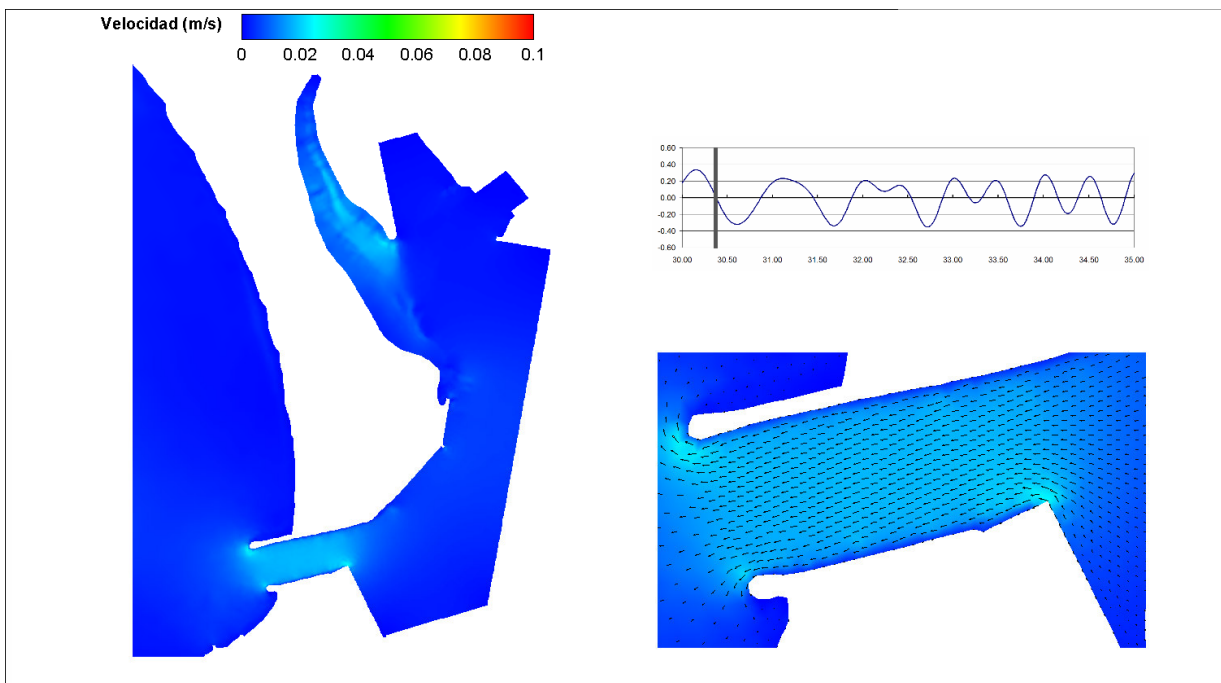


Figura 5.38 Campo de elevaciones. 30 abril 2009, 09:00 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

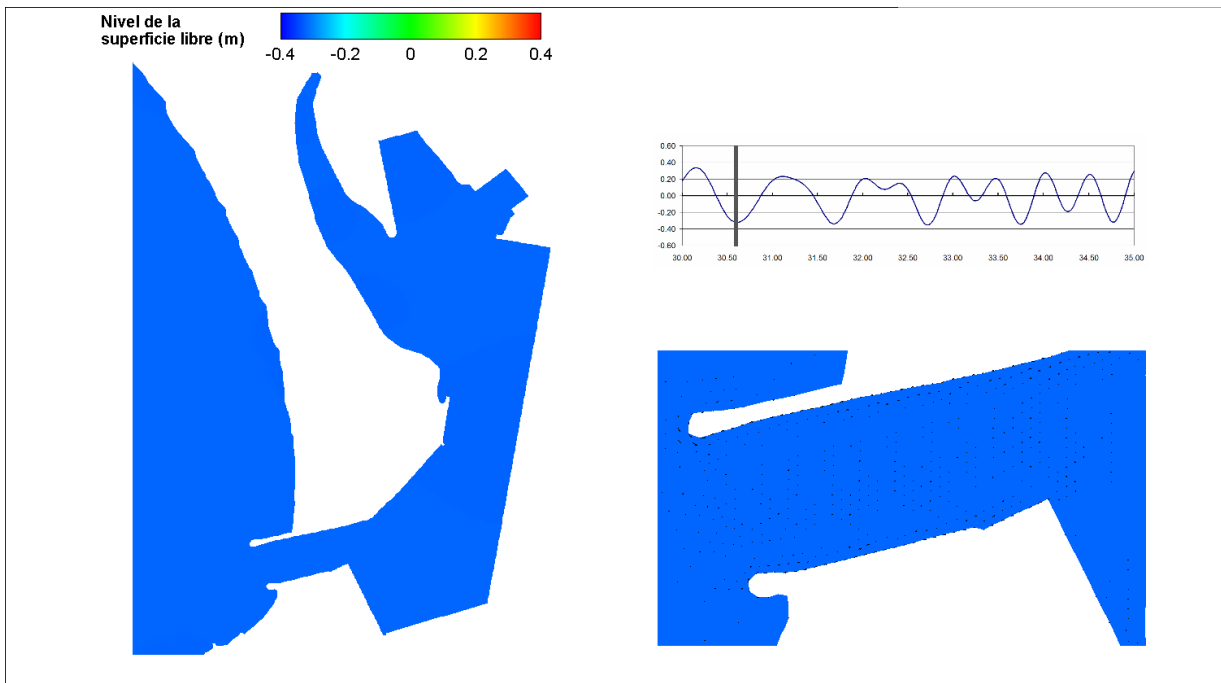


Figura 5.39 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 14:30 h.

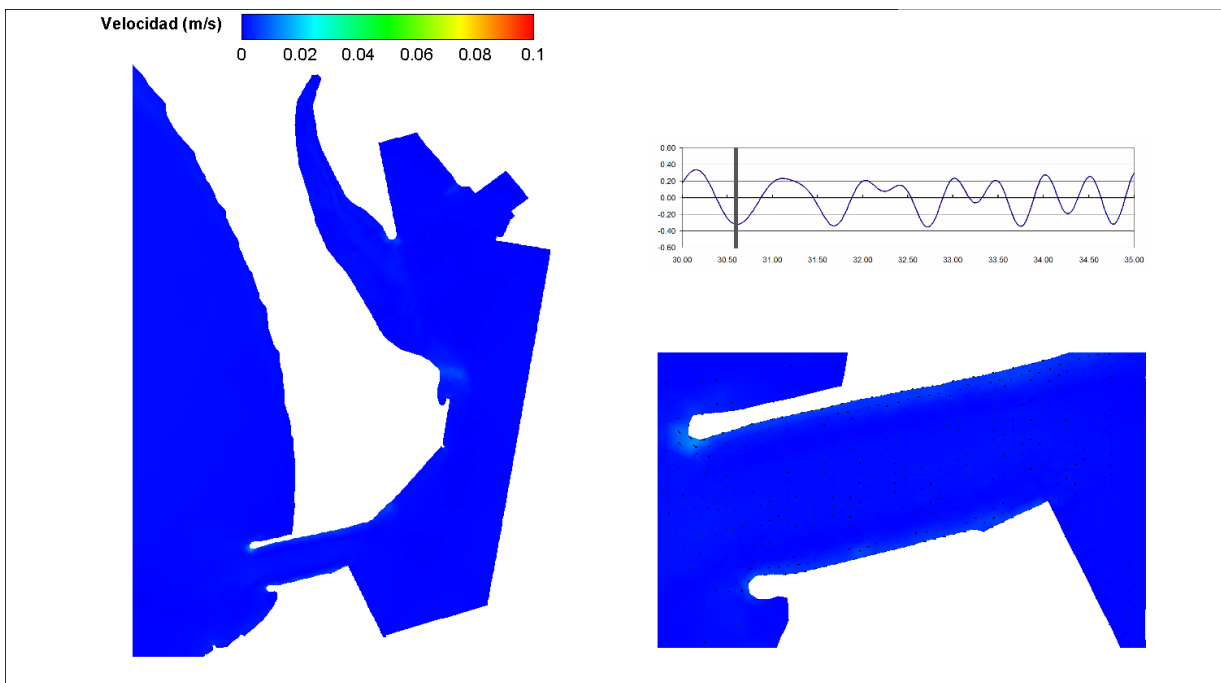


Figura 5.40 Campo de elevaciones. 30 abril 2009, 14:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

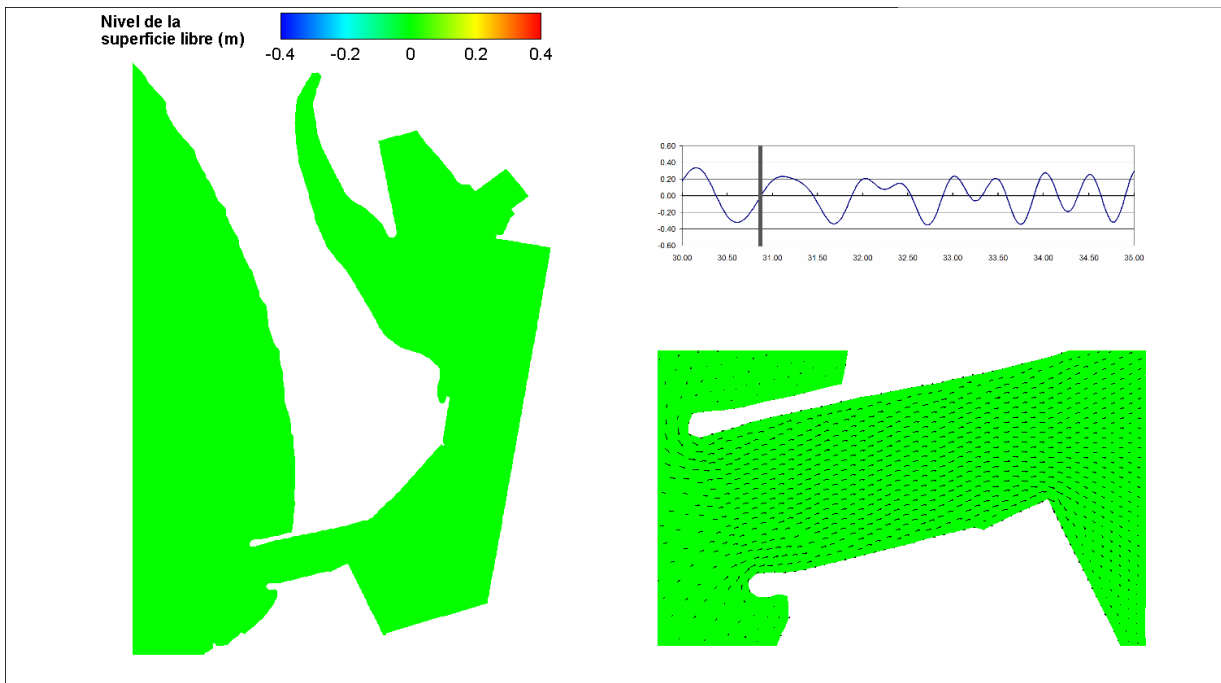


Figura 5.41 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 21:00 h

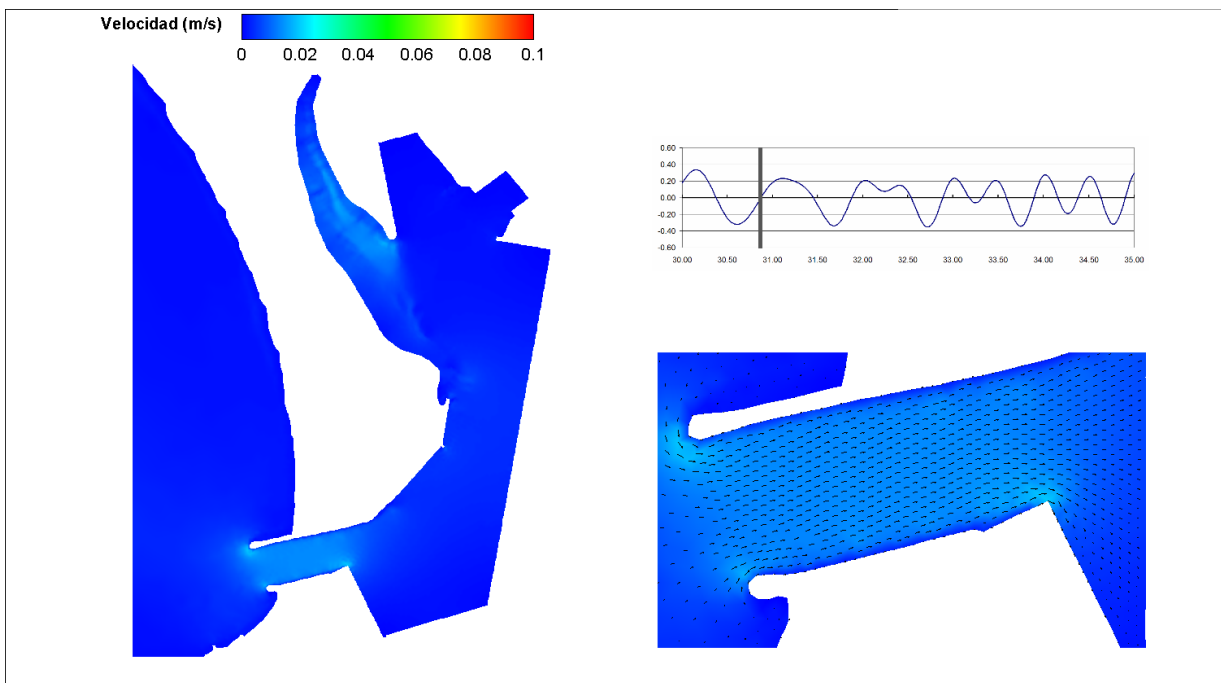


Figura 5.42 Campo de elevaciones. 30 abril 2009, 21:00 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

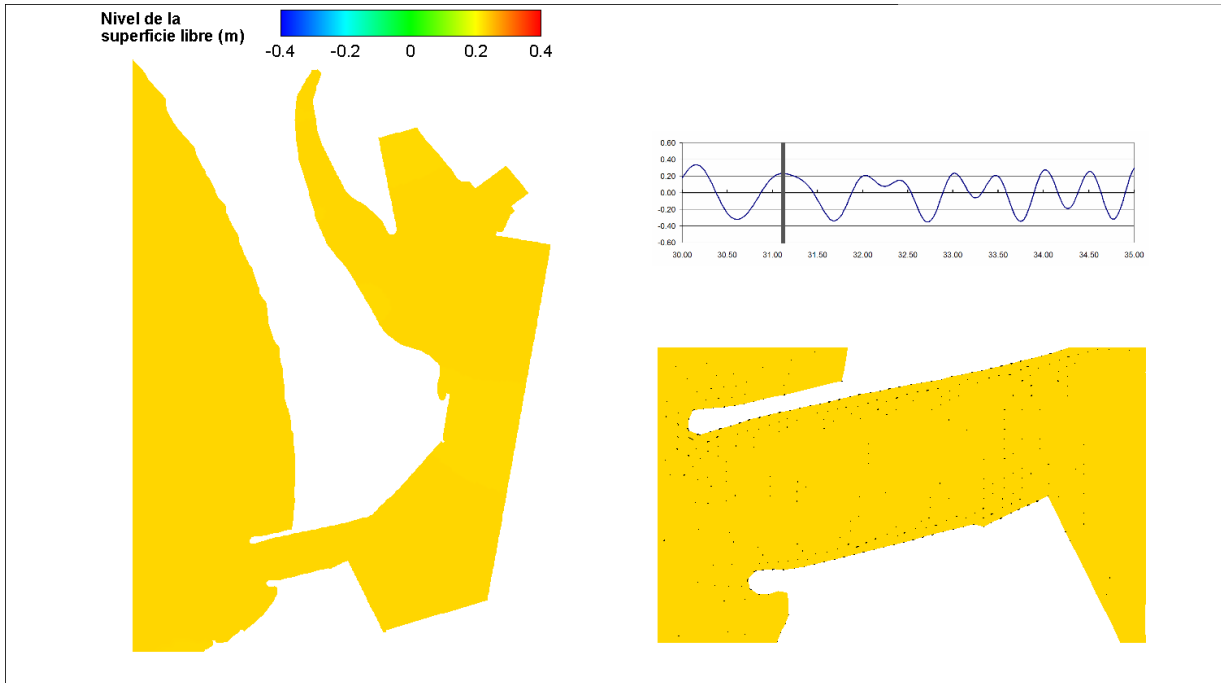


Figura 5.43 Elevación de la superficie libre en el puerto. 1 mayo 2009, 03:00 h

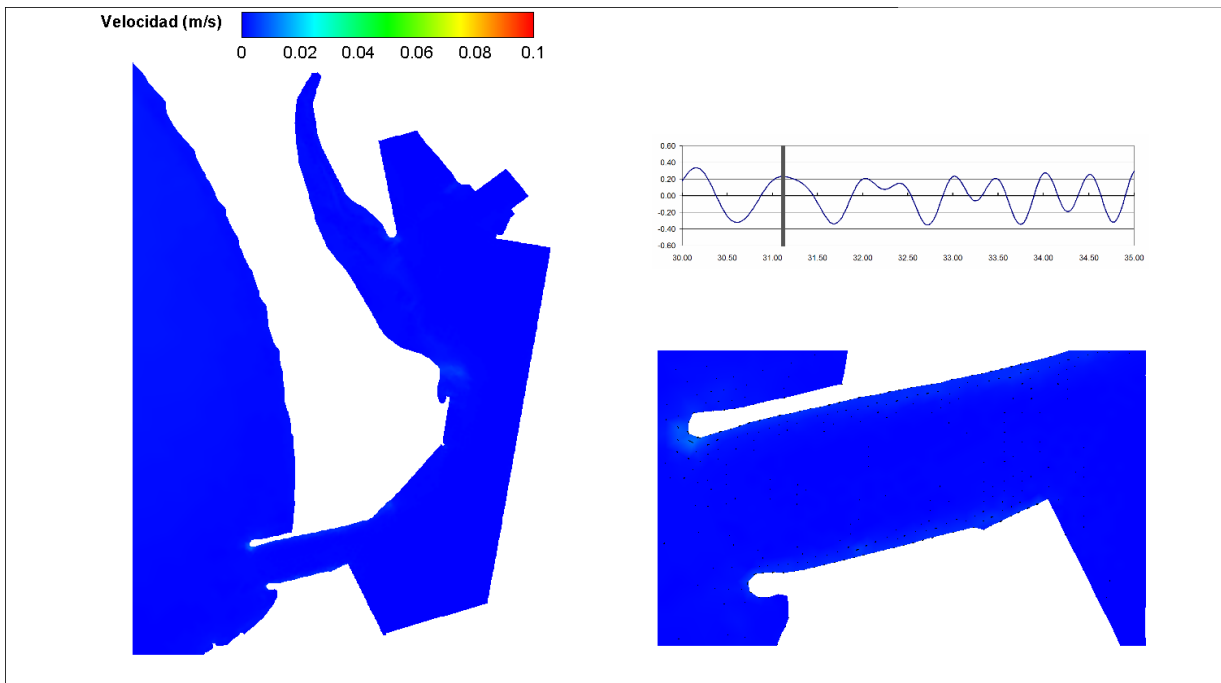


Figura 5.44 Campo de elevaciones. 1 mayo 2009, 03:00 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

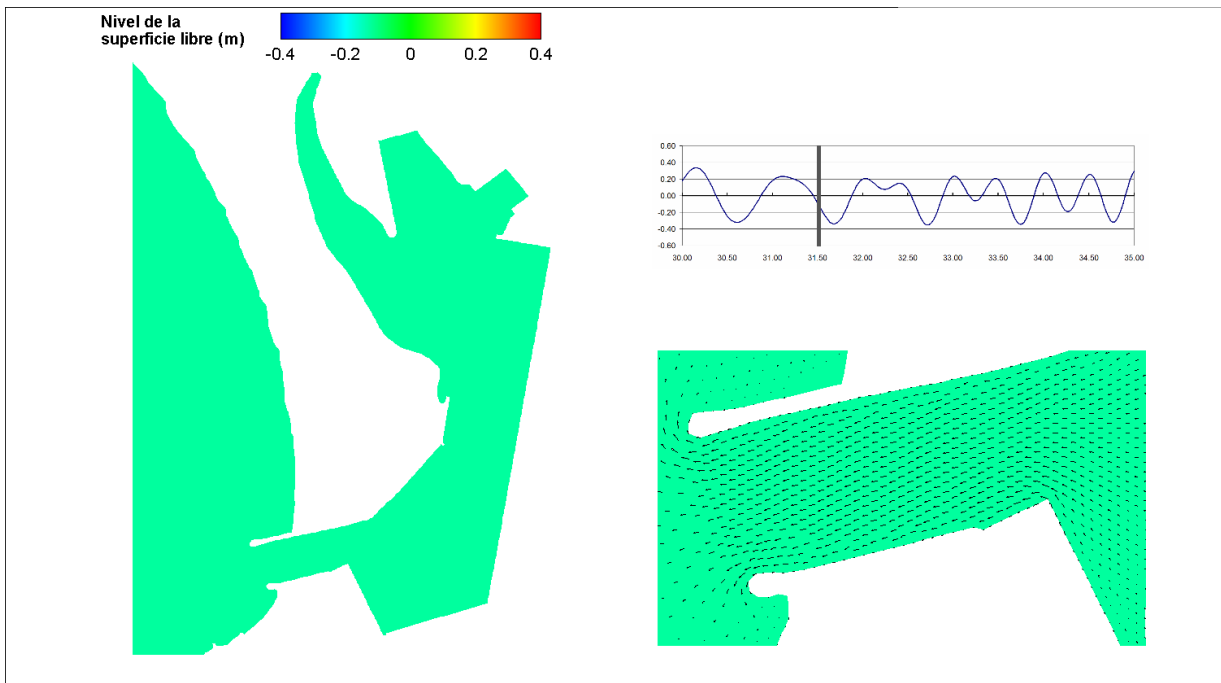


Figura 5.45 Elevación de la superficie libre en el puerto. 1 mayo 2009, 12:30 h

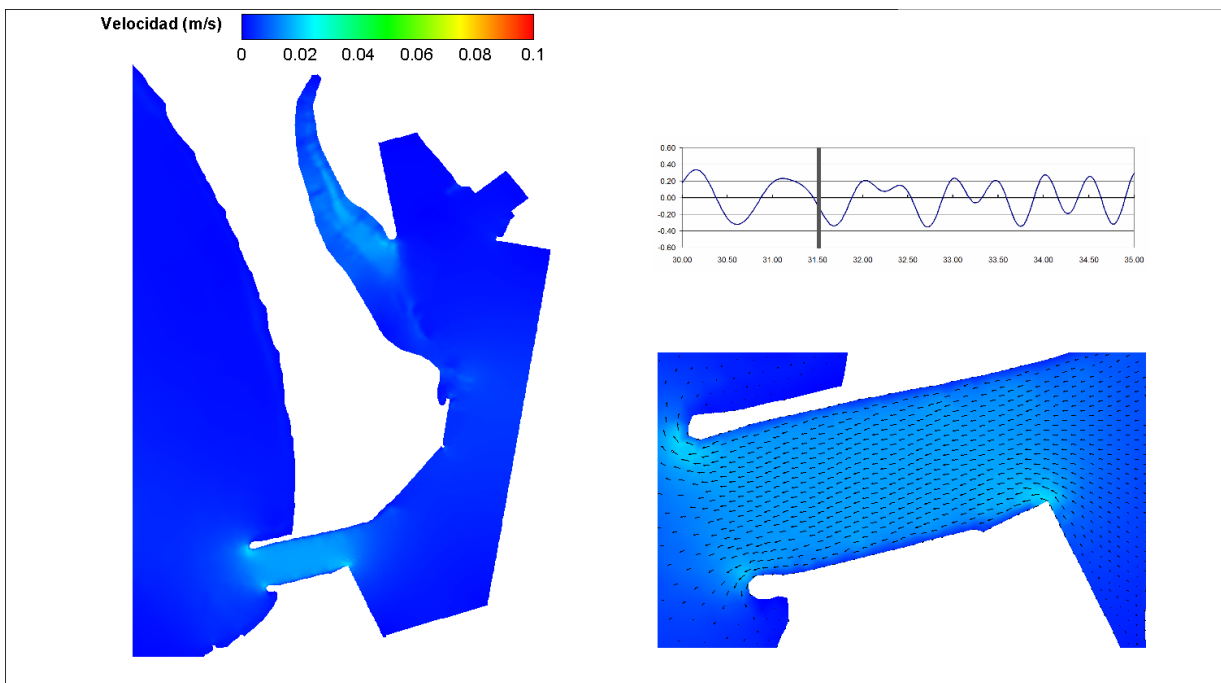


Figura 5.46 Campo de elevaciones. 1 mayo 2009, 12:30 h

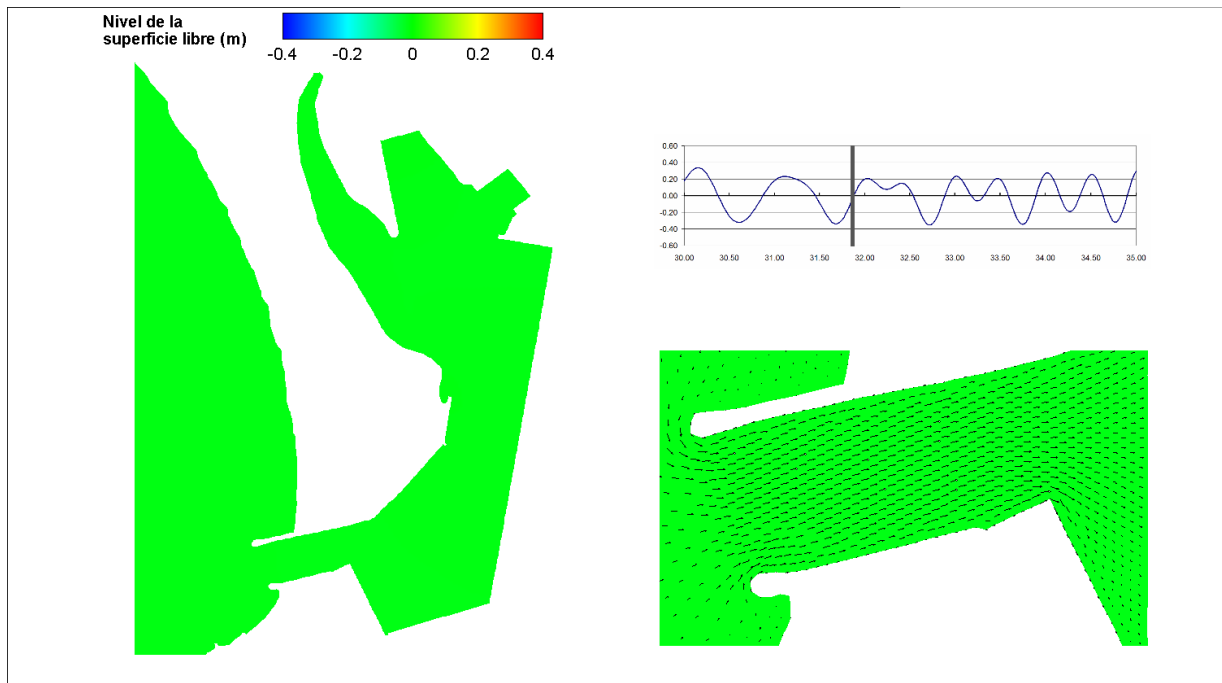


Figura 5.47 Elevación de la superficie libre en el puerto. 1 mayo 2009, 21:00 h

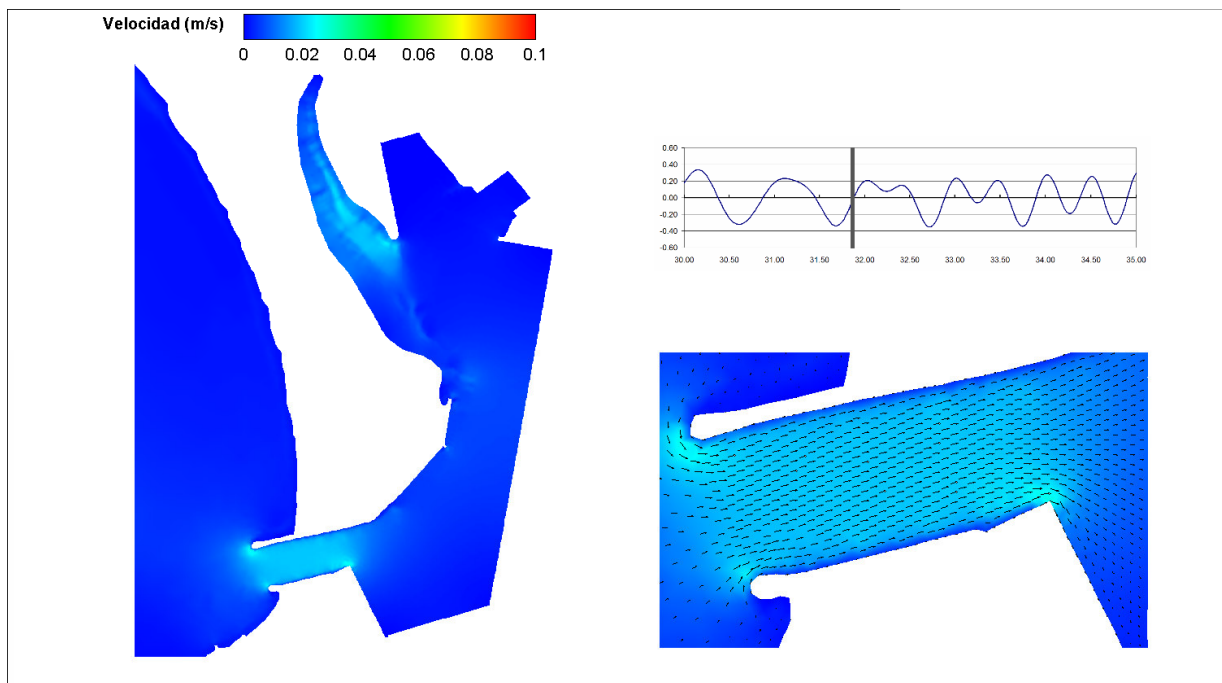


Figura 5.48 Campo de elevaciones. 1 mayo 2009, 21:00 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

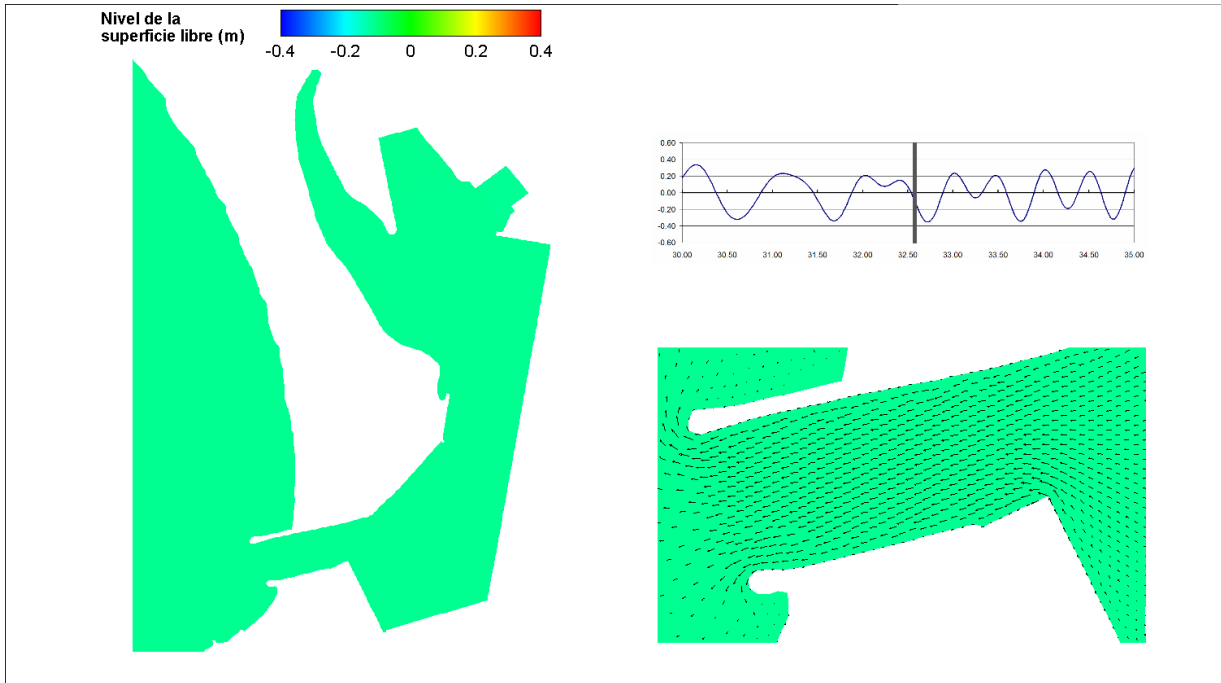


Figura 5.49 Elevación de la superficie libre en el puerto. 2 mayo 2009, 14:00 h

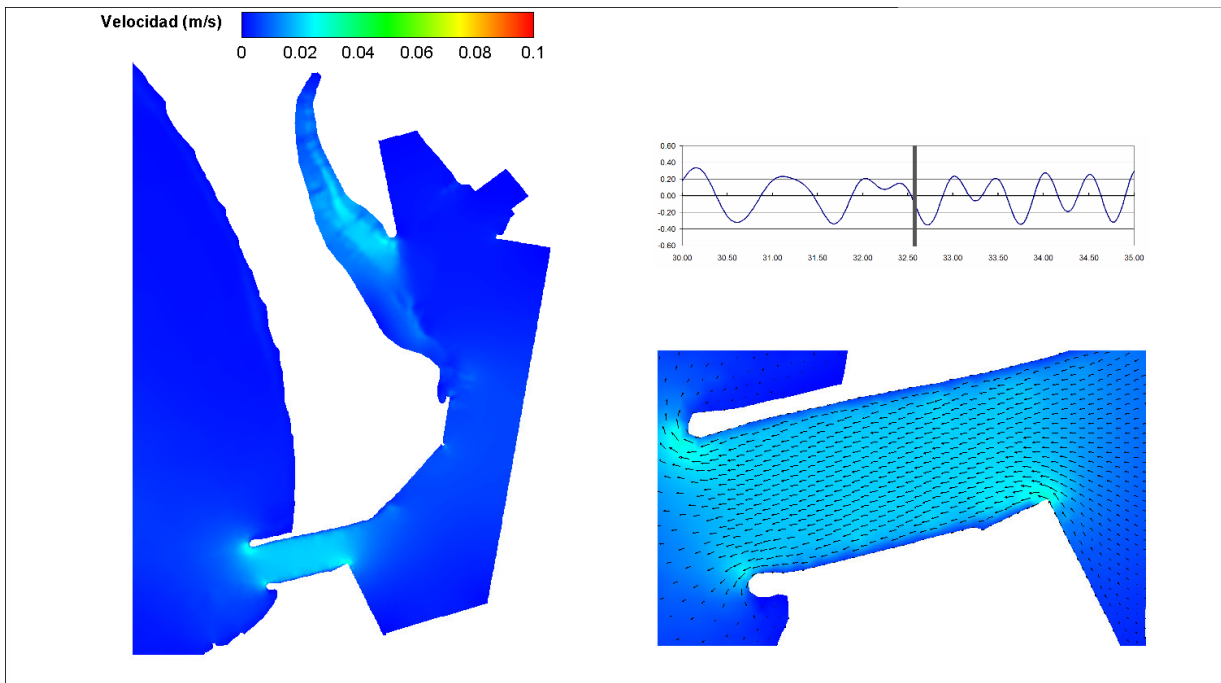


Figura 5.50 Campo de elevaciones. 2 mayo 2009, 14:00 h

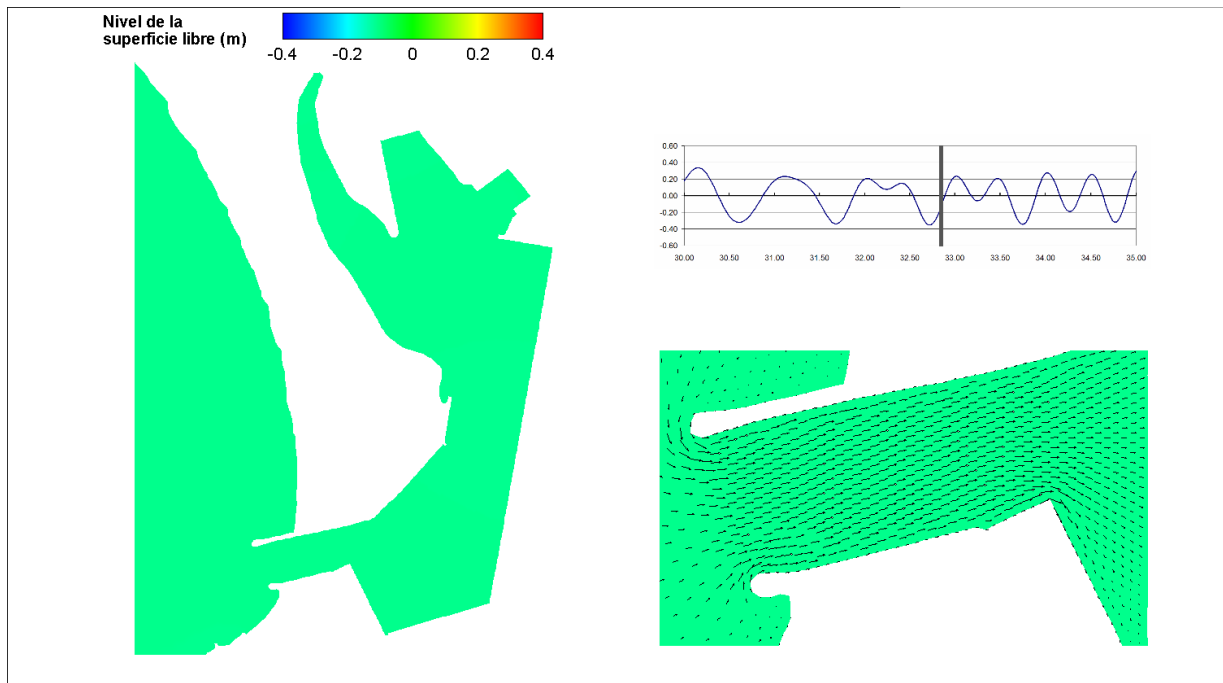


Figura 5.51 Elevación de la superficie libre en el puerto. 2 mayo 2009, 20:30 h

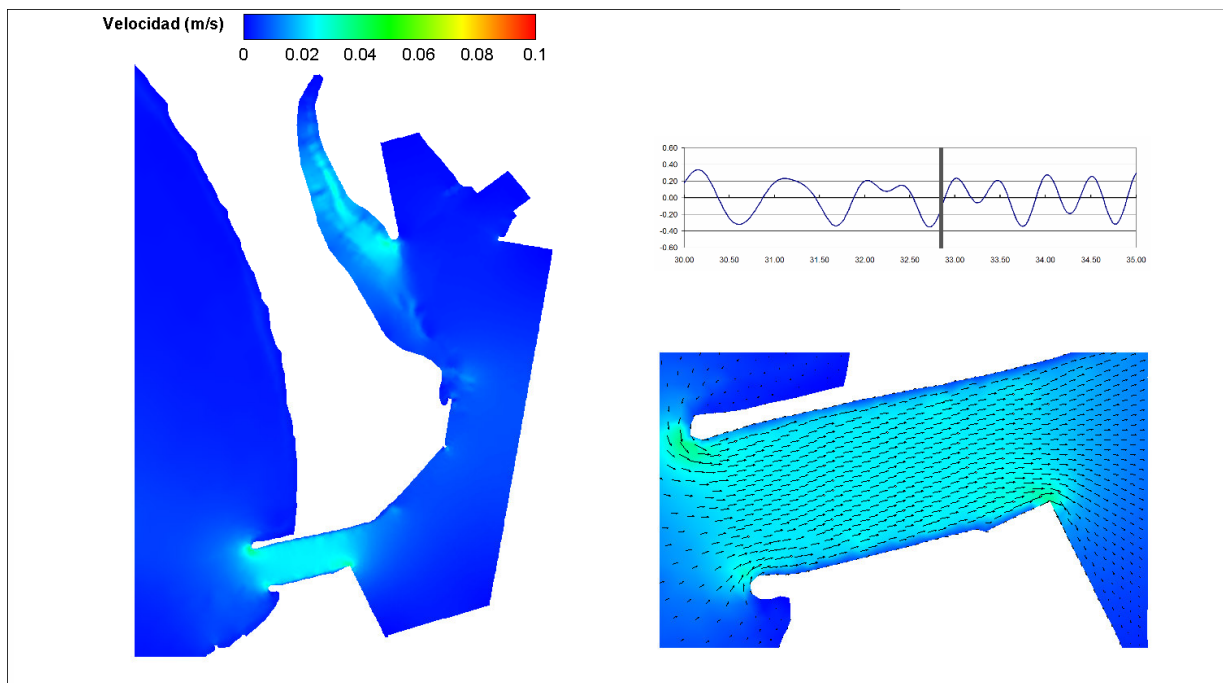


Figura 5.52 Campo de elevaciones. 2 mayo 2009, 20:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

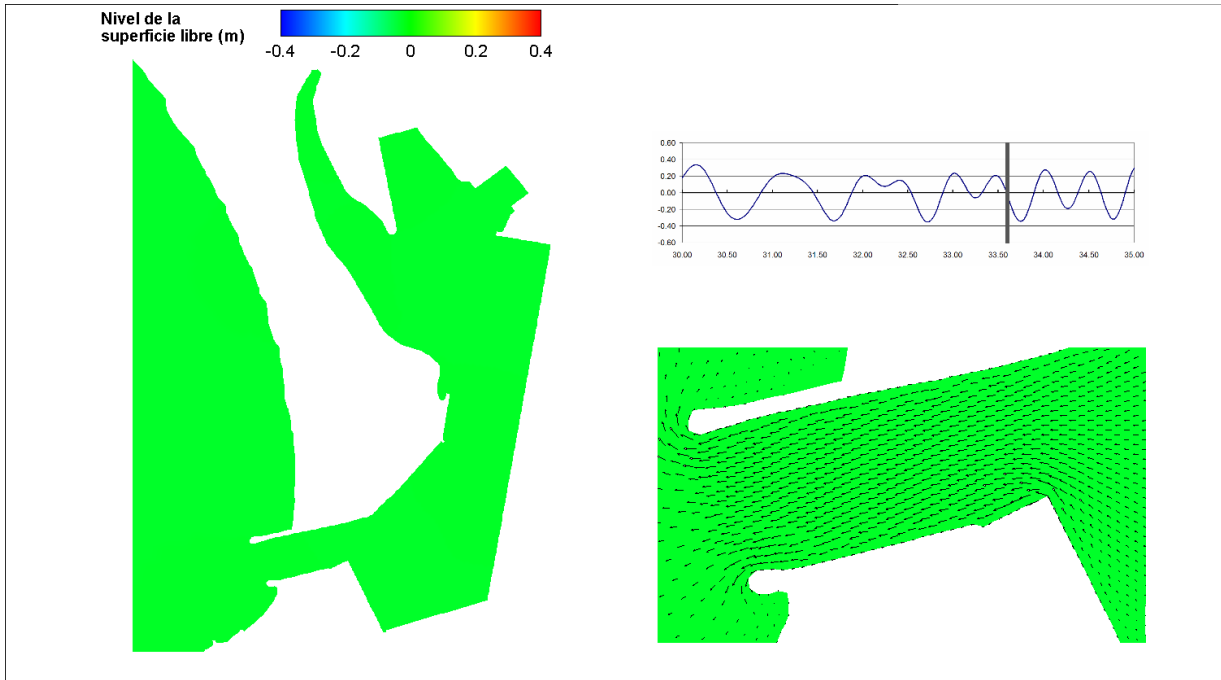


Figura 5.53 Elevación de la superficie libre en el puerto. 3 mayo 2009, 14:30 h

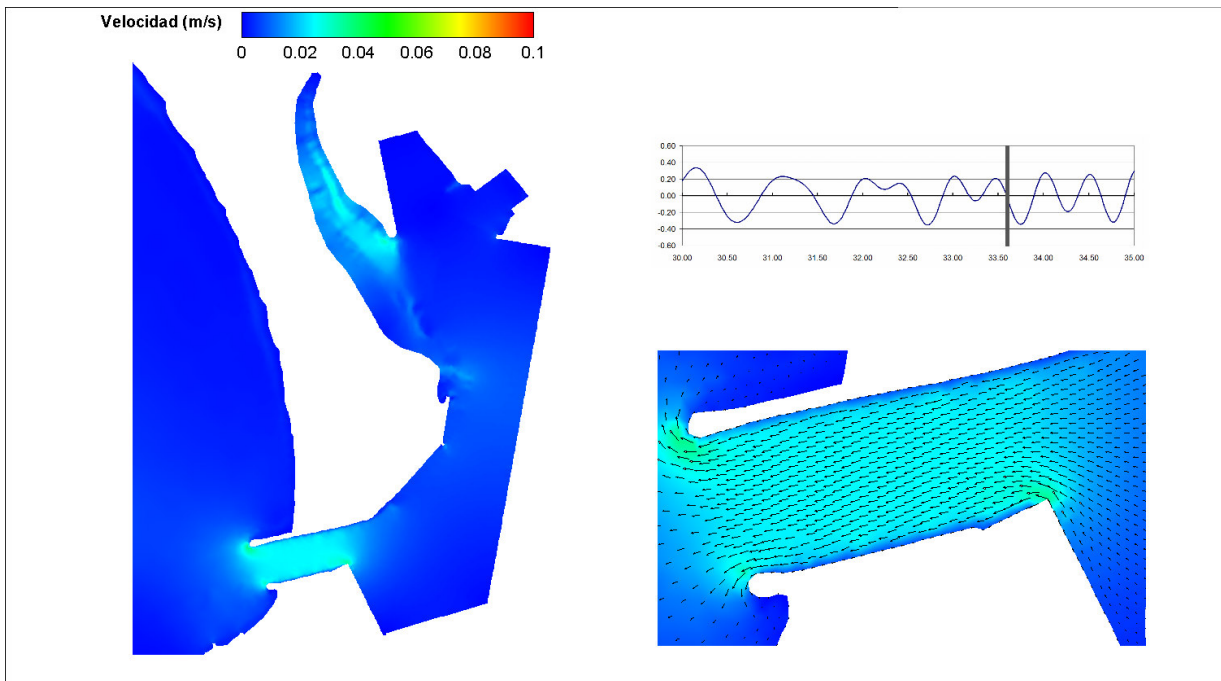


Figura 5.54 Campo de elevaciones. 3 mayo 2009, 14:30 h

5.2 Simulación numérica bajo condiciones de ampliación

Para llevar a cabo las simulaciones bajo condiciones de proyecto, el dominio de cálculo fue discretizado mediante una malla de 54783 elementos y 29583 nodos, con tamaño de elementos variable. En el interior del puerto el tamaño medio del elemento fue de 15 m, en el interior de la laguna de las garzas de 10 m, en la franja ecológica de 7 m, y en los drenes ecológicos de 5 m. De la figura 5.55 a la figura 5.57 se muestran algunos detalles de la transición del tamaño de los elementos para diferentes zonas de dominio de cálculo.

A continuación se presentan las condiciones hidrodinámicas para mareas vivas y mareas muertas, considerando los mismos periodos de tiempo de simulación del inciso anterior, por lo tanto, las condiciones de forzamiento fueron idénticas.

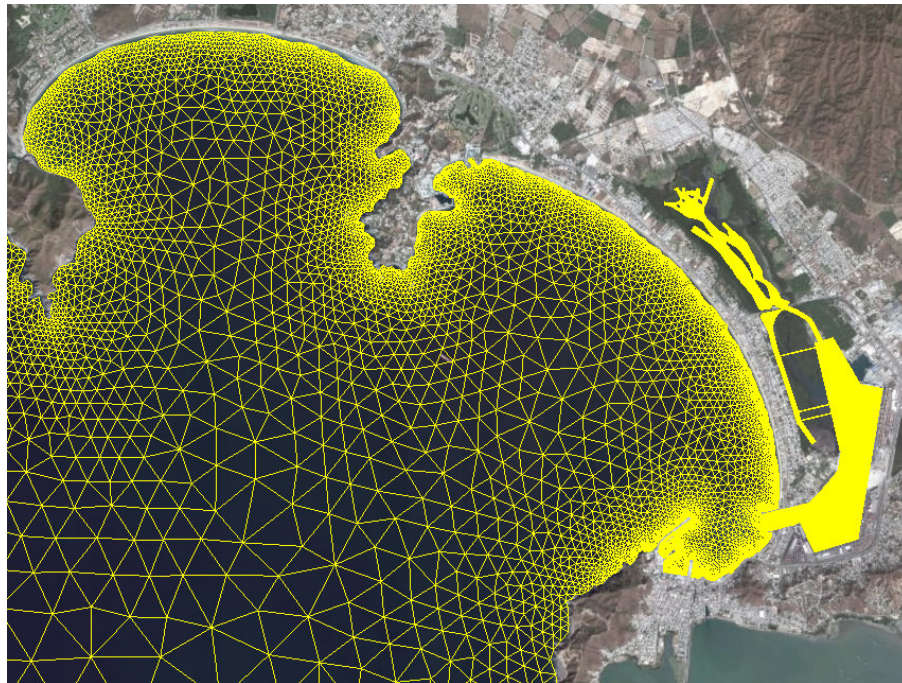


Figura 5.55 Detalle de la malla en las Bahías.



Figura 5.56 Detalle de la malla en la laguna de Las Garzas.

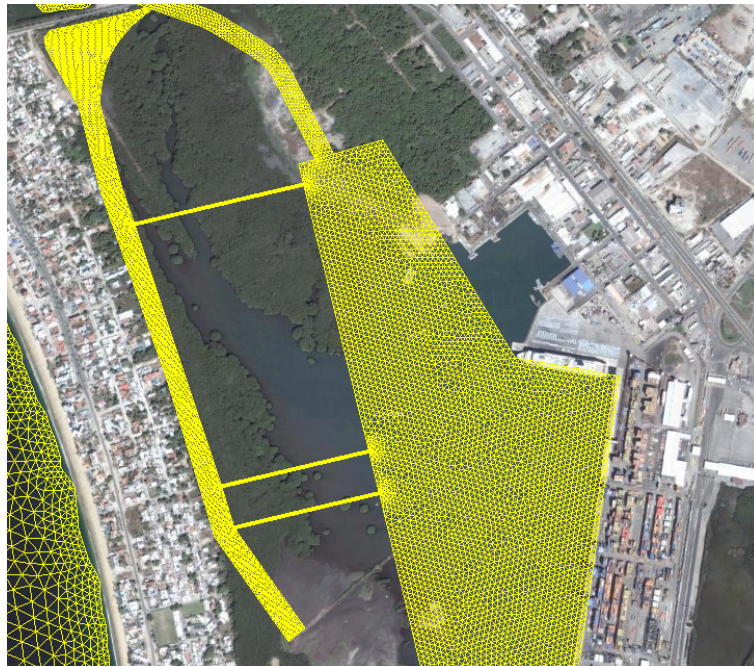


Figura 5.57 Detalle de la malla en la franja ecológica y el canal de comunicación.



a) Mareas vivas

La figura 5.58 a la figura 5.77 muestran las condiciones hidrodinámicas en las condiciones de proyecto, éstas se presentan en pares mostrando los valores de la superficie libre y el campo de velocidades.

Puede observarse que tanto la franja ecológica, así como también la configuración de proyecto de la Laguna de las Garzas responden de manera adecuada a las condiciones de la marea (figura 5.58 a figura 5.76 numeración par).

Para condiciones de flujo (cuando la marea sube), las velocidades máximas se localizan a lo largo del canal de comunicación entre la Laguna de las Garzas y el puerto de Manzanillo, con valores del orden de los 25 cm/s. Por otra parte, los drenes ecológicos también presentan una hidrodinámica importante, alcanzando velocidades del orden de los 18 cm/s (figura 5.63)

En condiciones de reflujo (cuando la marea baja), las velocidades máximas se localizan en el canal de comunicación con valores máximos del orden de los 30 cm/s, mientras que en los drenes ecológicos las velocidades alcanzan valores de 23 cm/s (figura 5.67).

Es importante señalar, que en la zona norte de la Lagunas de las Garzas, donde se encuentran las cuatro islas artificiales, la dinámica es muy pobre, lo que la convierte en una zona probable de acumulación de sedimentos en caso de que le lleguen producto de las descargas pluviales.

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

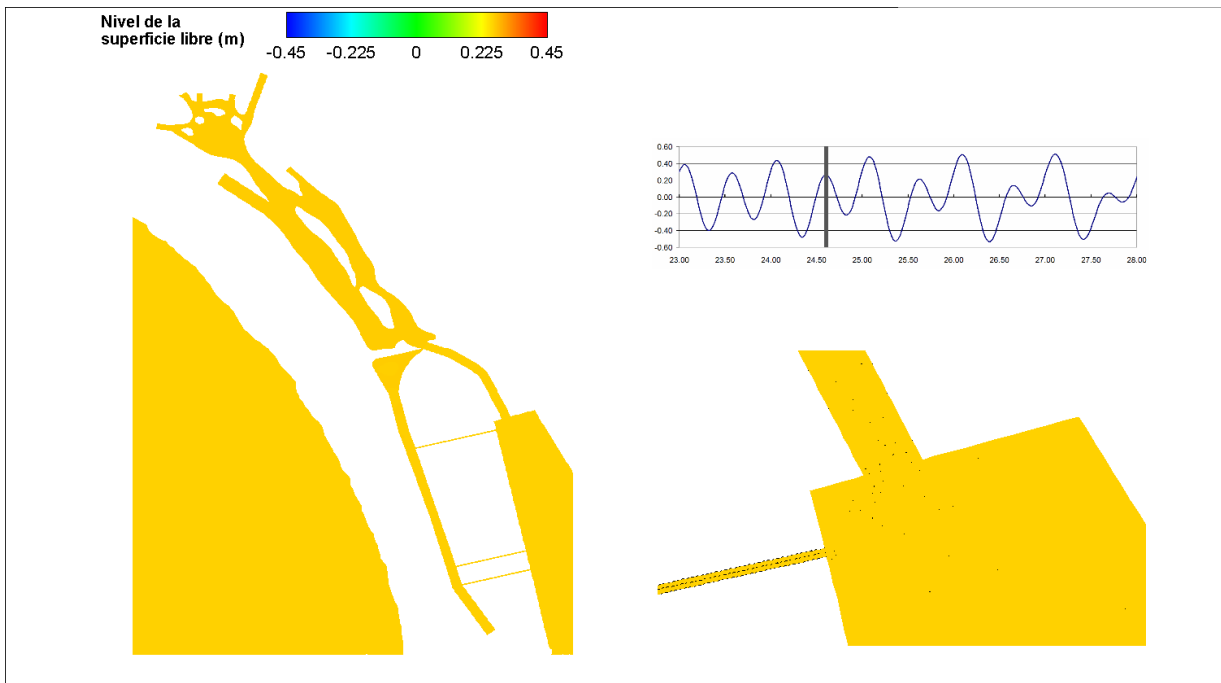


Figura 5.58 Elevación de la superficie libre en el puerto. 24 abril 2009, 14:30 h

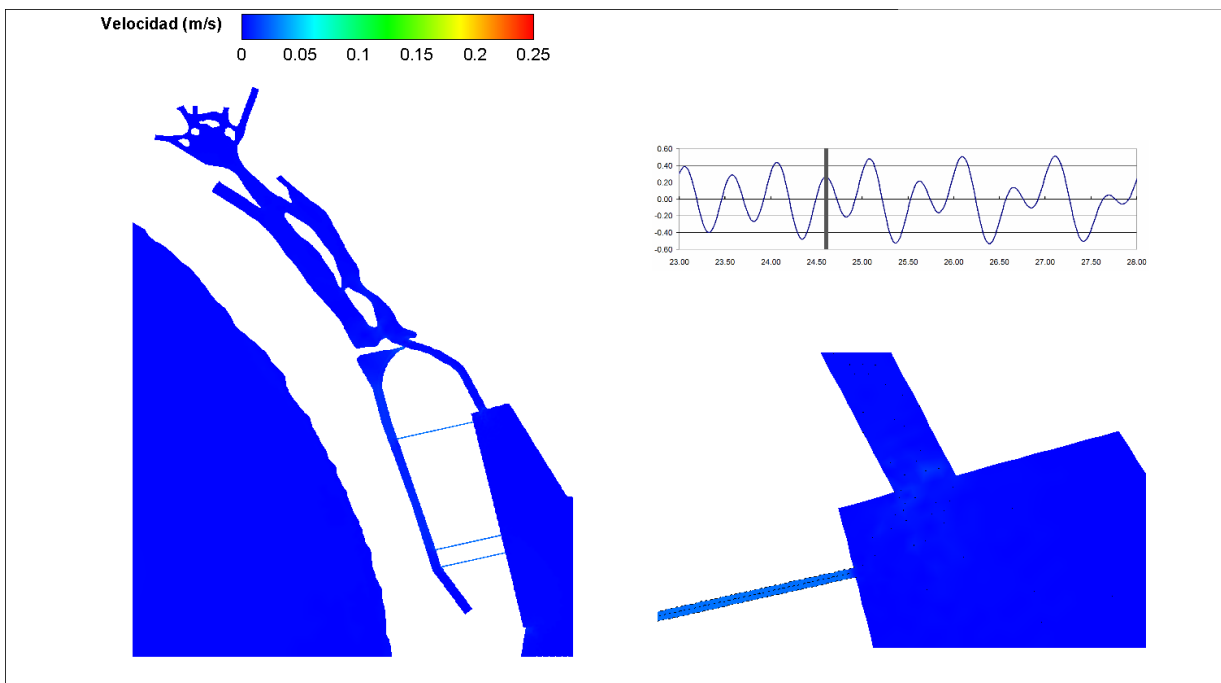


Figura 5.59 Campo de velocidades. 24 abril 2009, 14:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

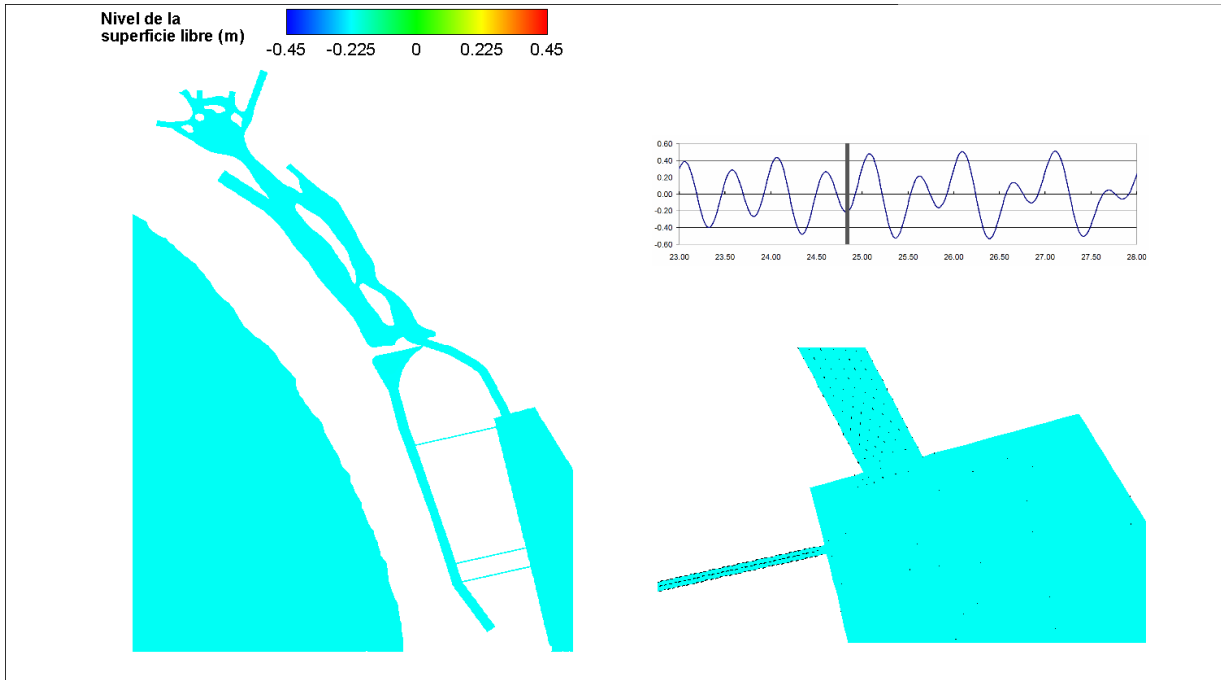


Figura 5.60 Elevación de la superficie libre en el puerto. 24 abril 2009, 20:00h

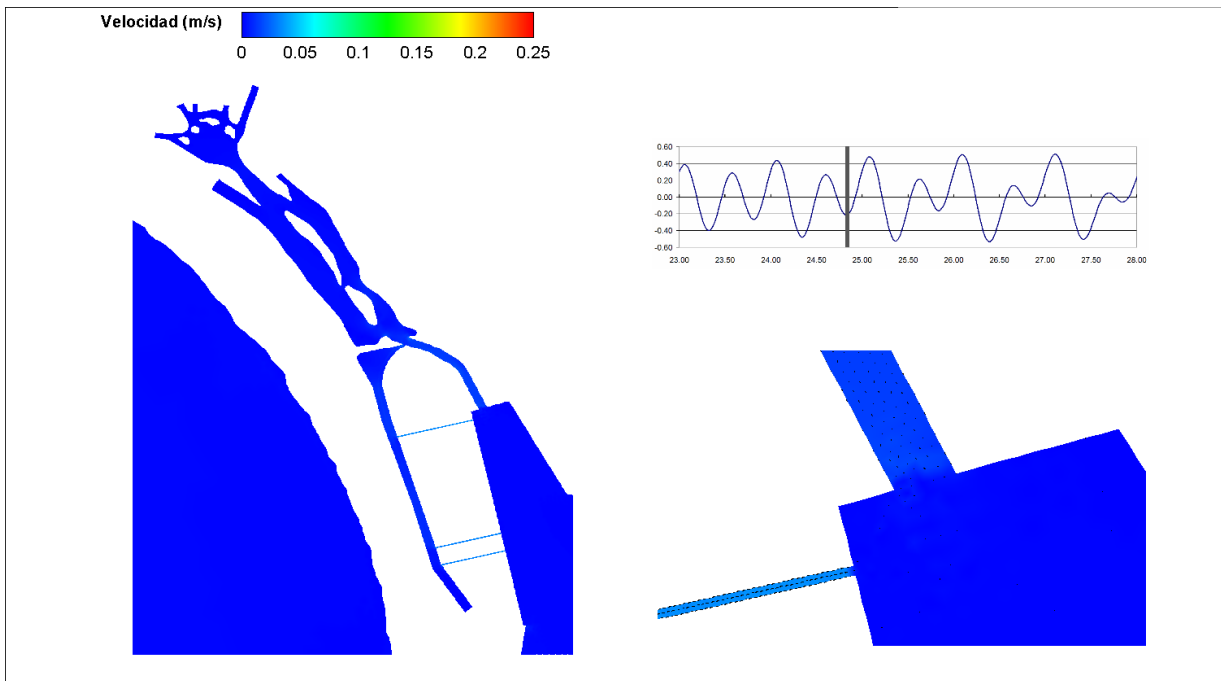


Figura 5.61 Campo de velocidades. 24 abril 2009, 20:00 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

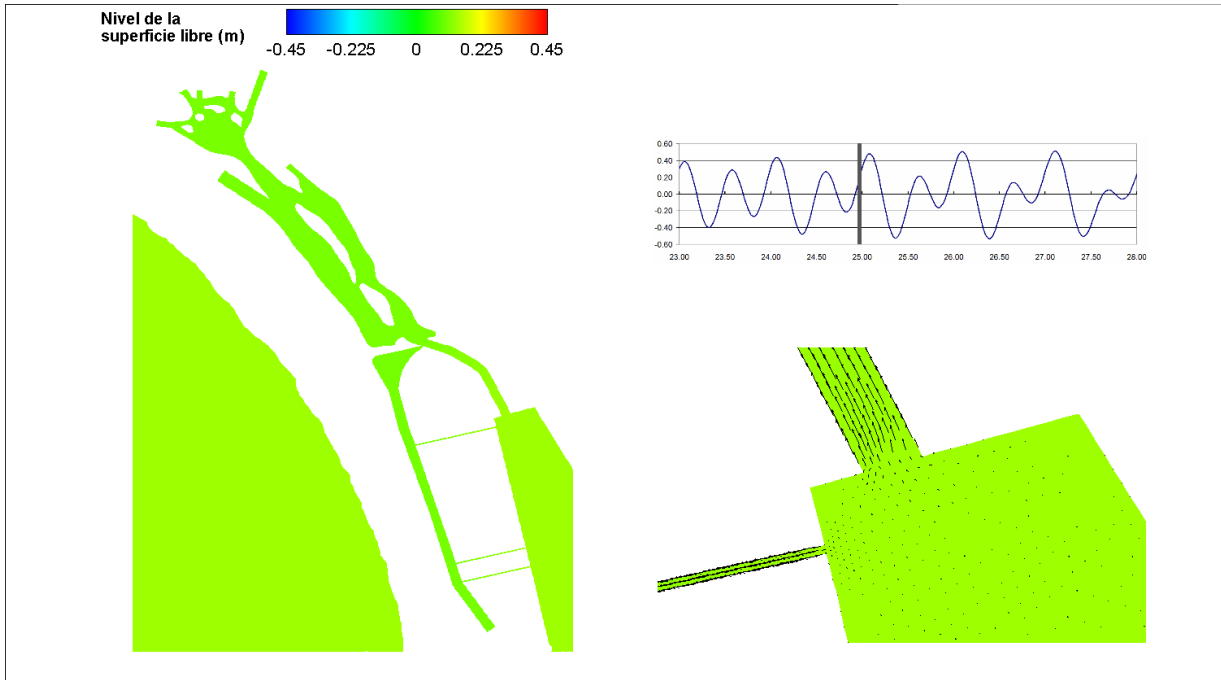


Figura 5.62 Elevación de la superficie libre en el puerto. 24 abril 2009, 23:00 h

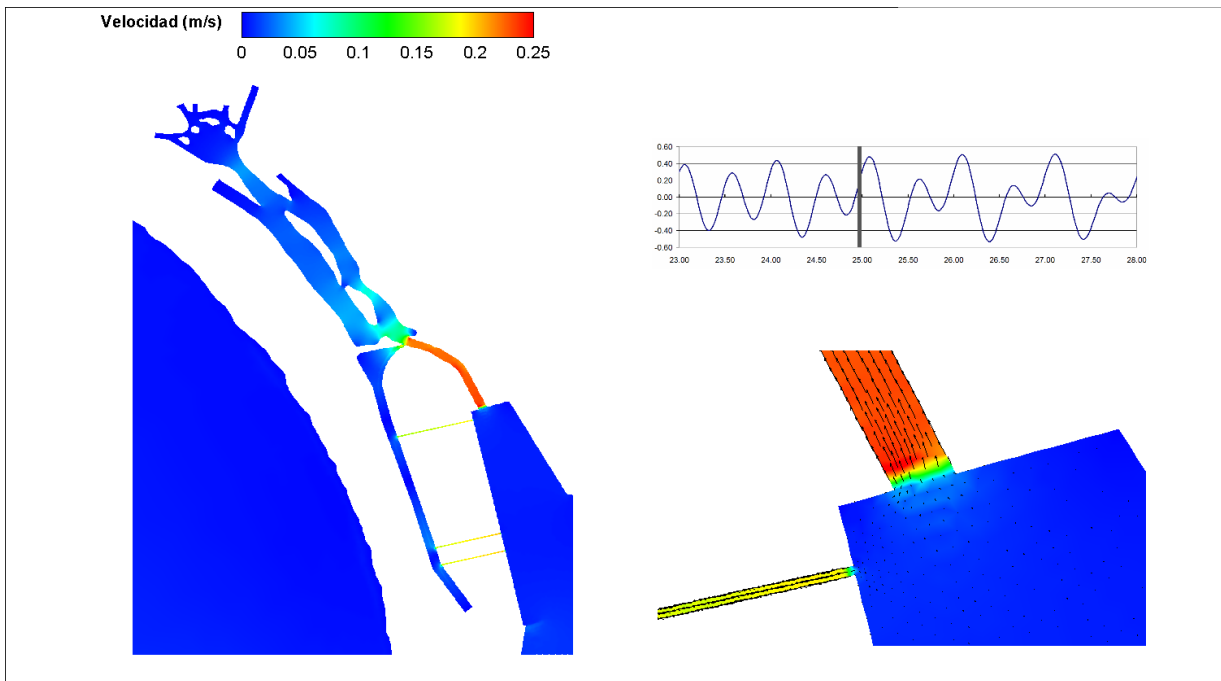


Figura 5.63 Campo de velocidades. 24 abril 2009, 23:00 h

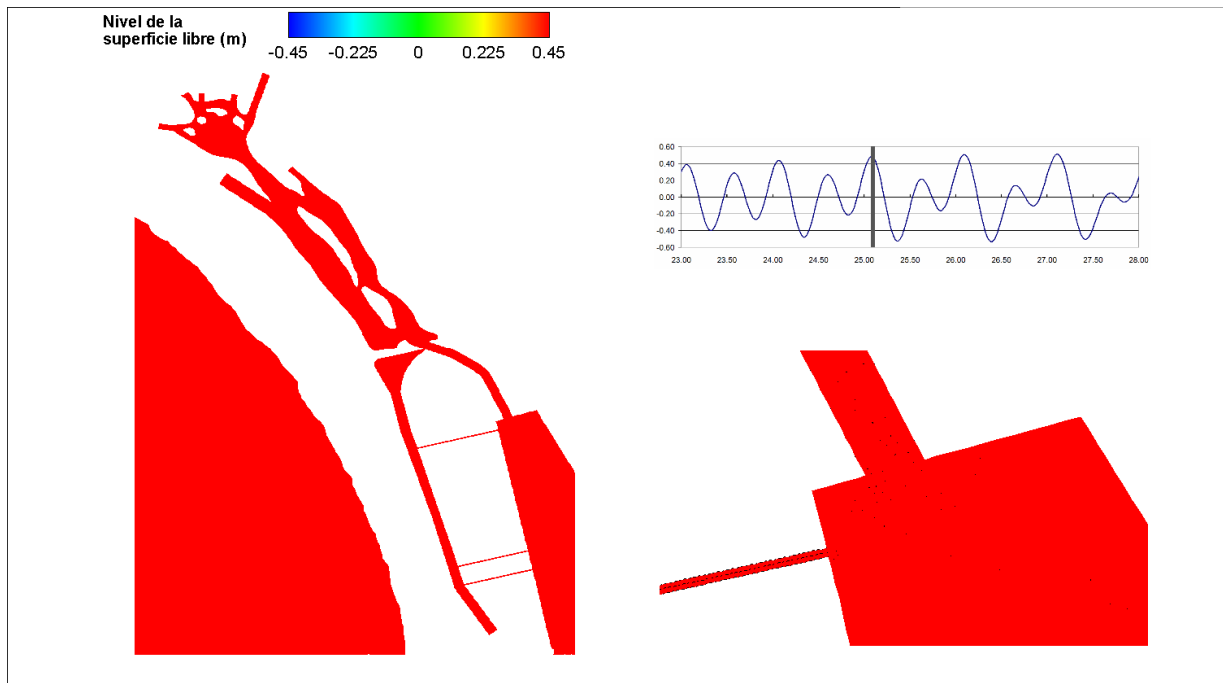


Figura 5.64 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 02:00 h

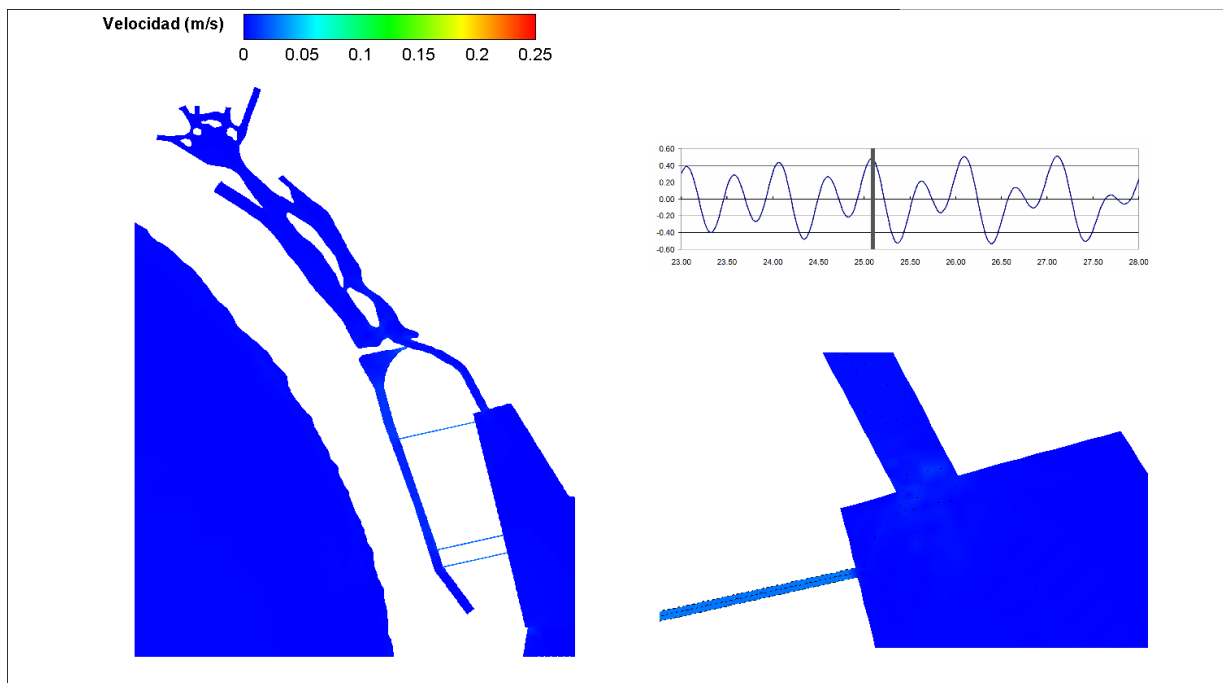


Figura 5.65 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 02:00 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

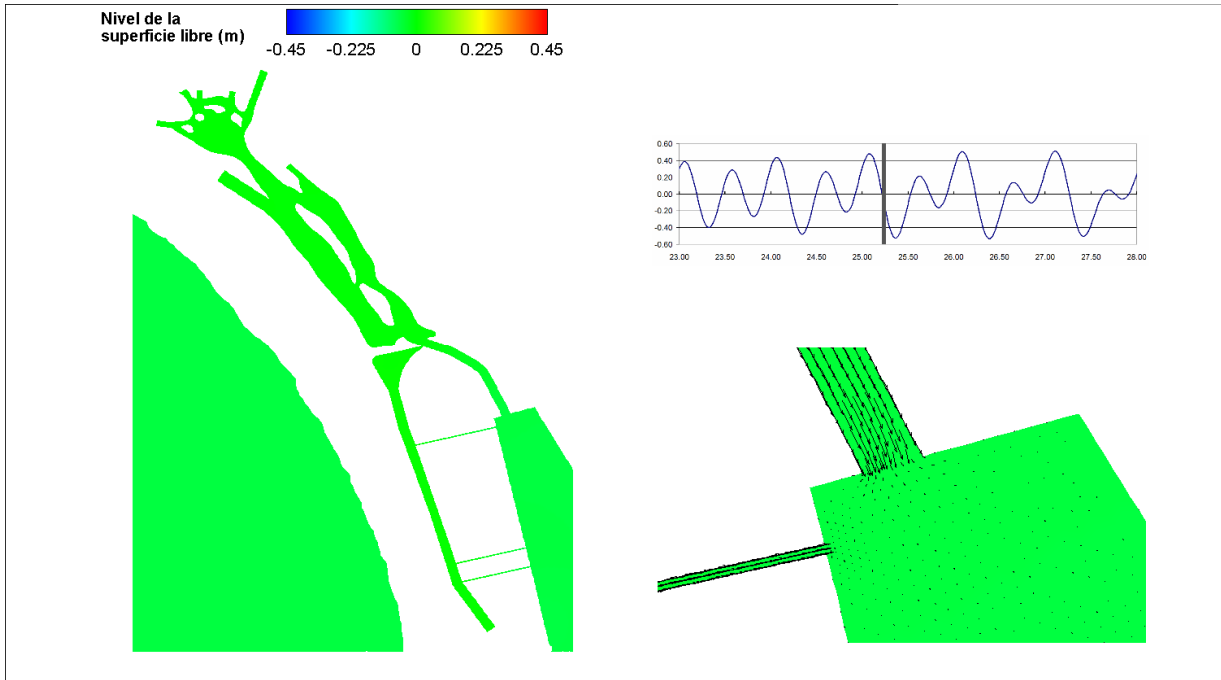


Figura 5.66 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 05:30 h

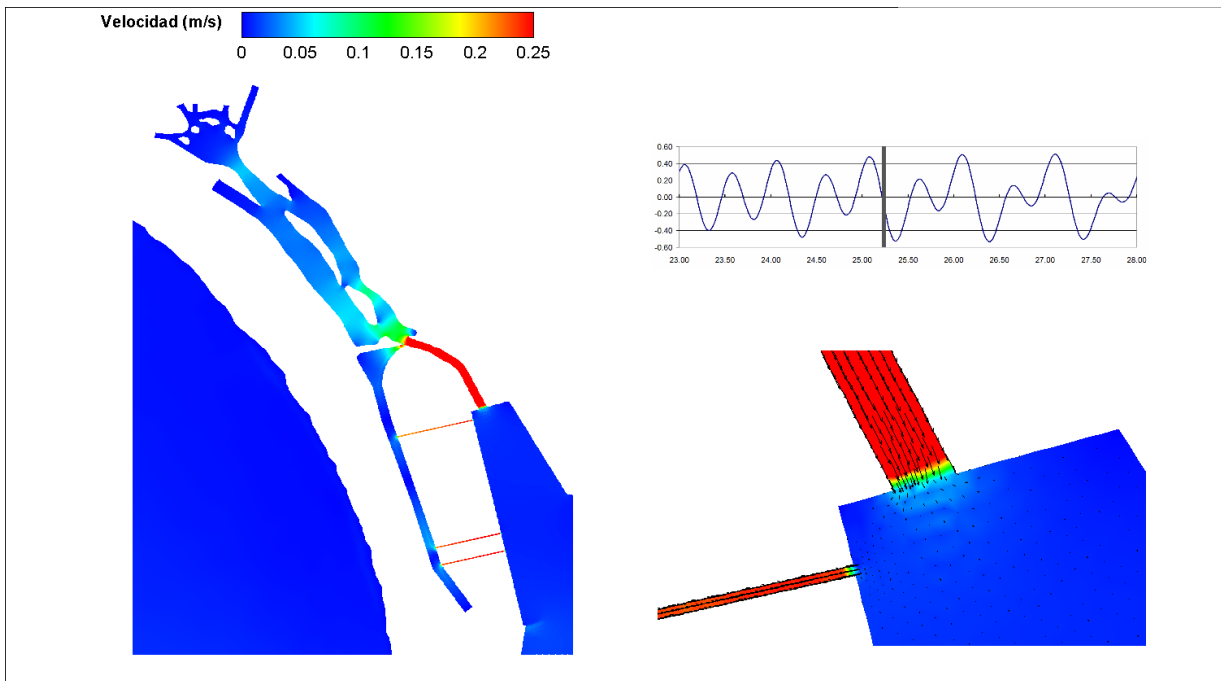


Figura 5.67 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 05:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

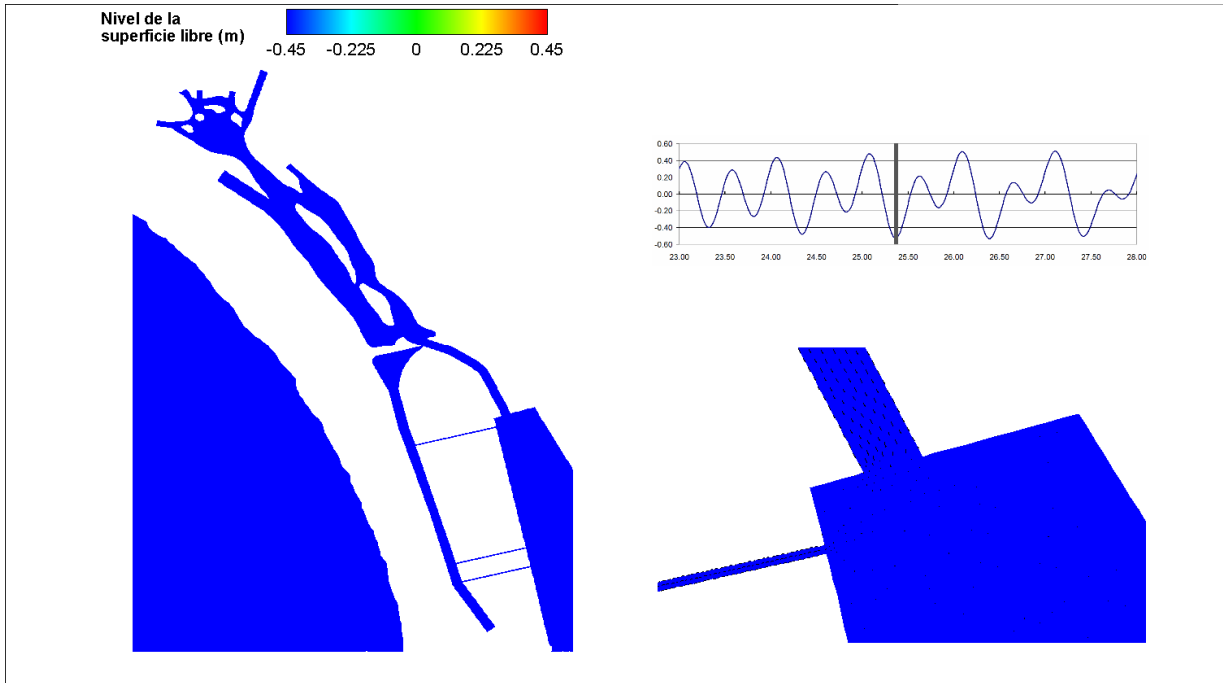


Figura 5.68 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 08:30 h

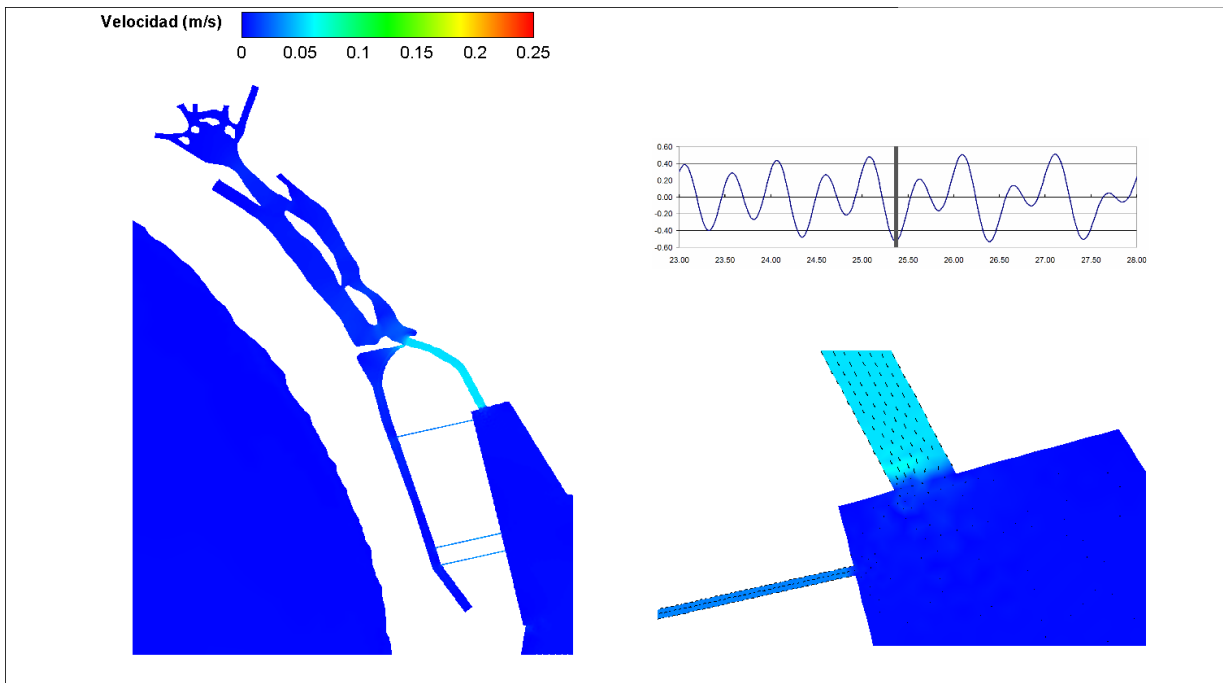


Figura 5.69 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 08:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

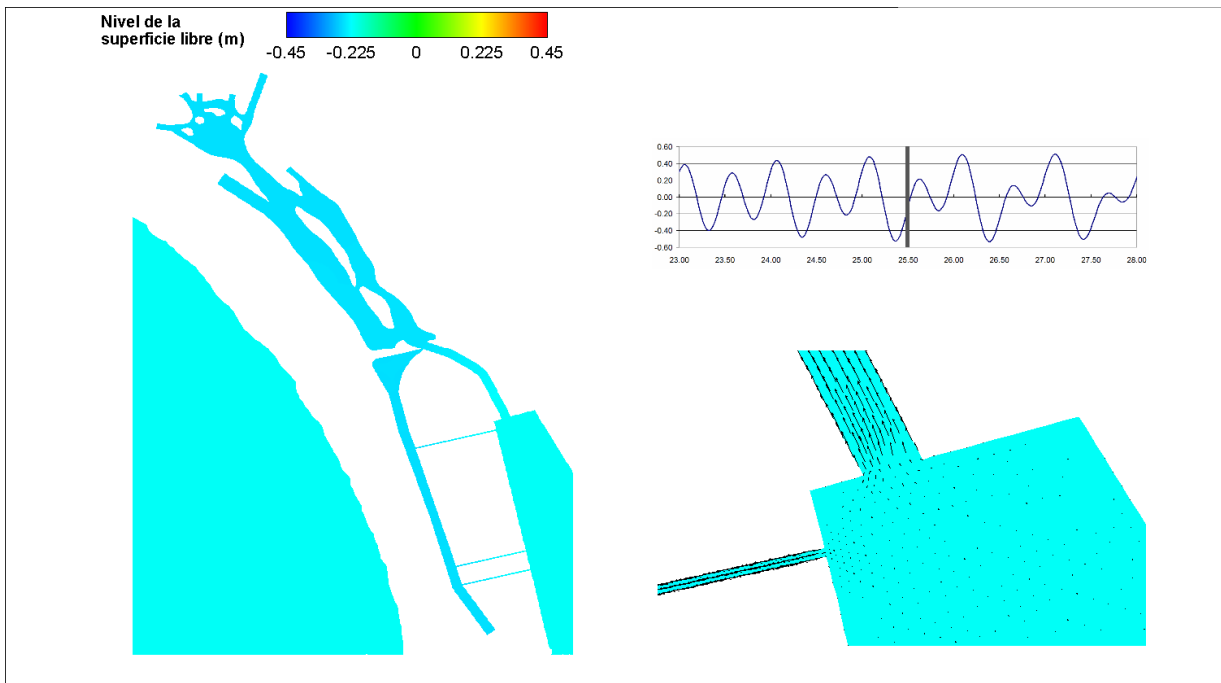


Figura 5.70 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 11:30 h

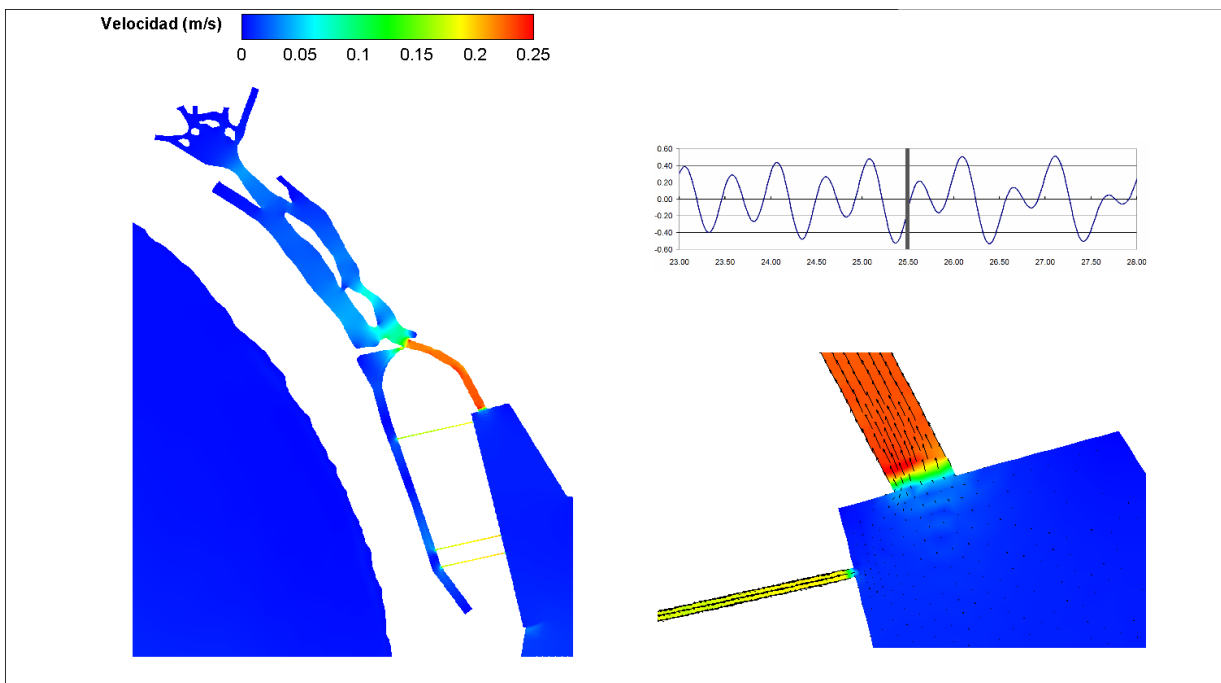


Figura 5.71 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 11:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

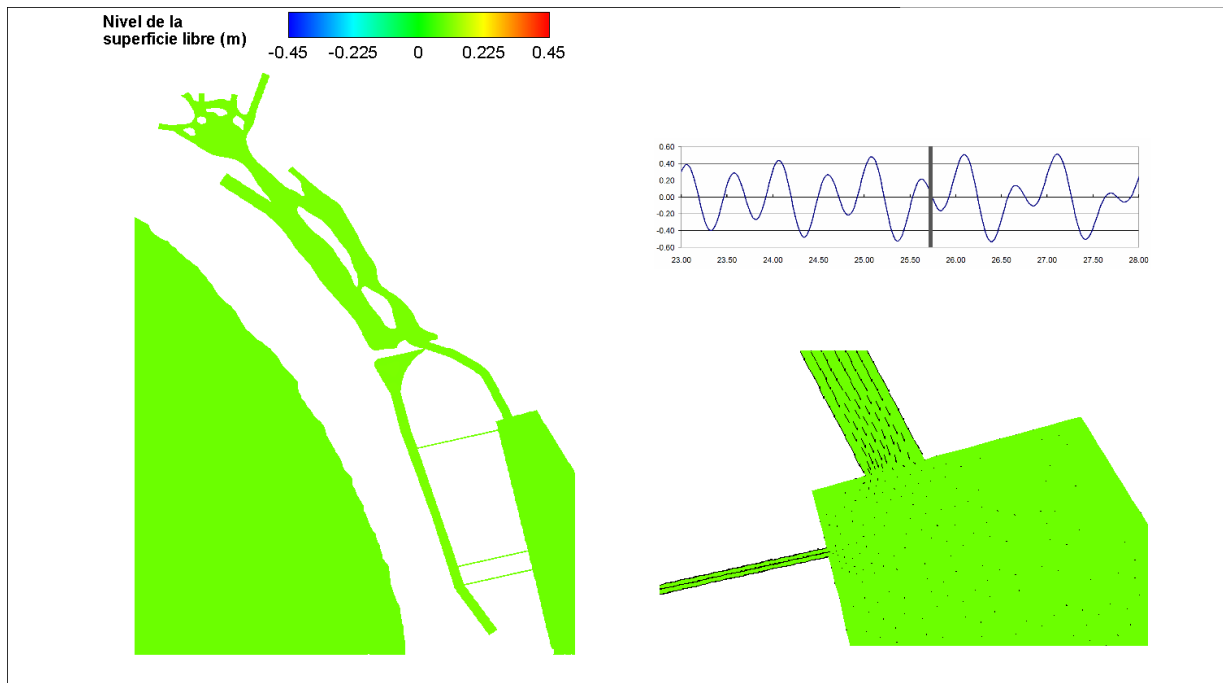


Figura 5.72 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 17:00 h

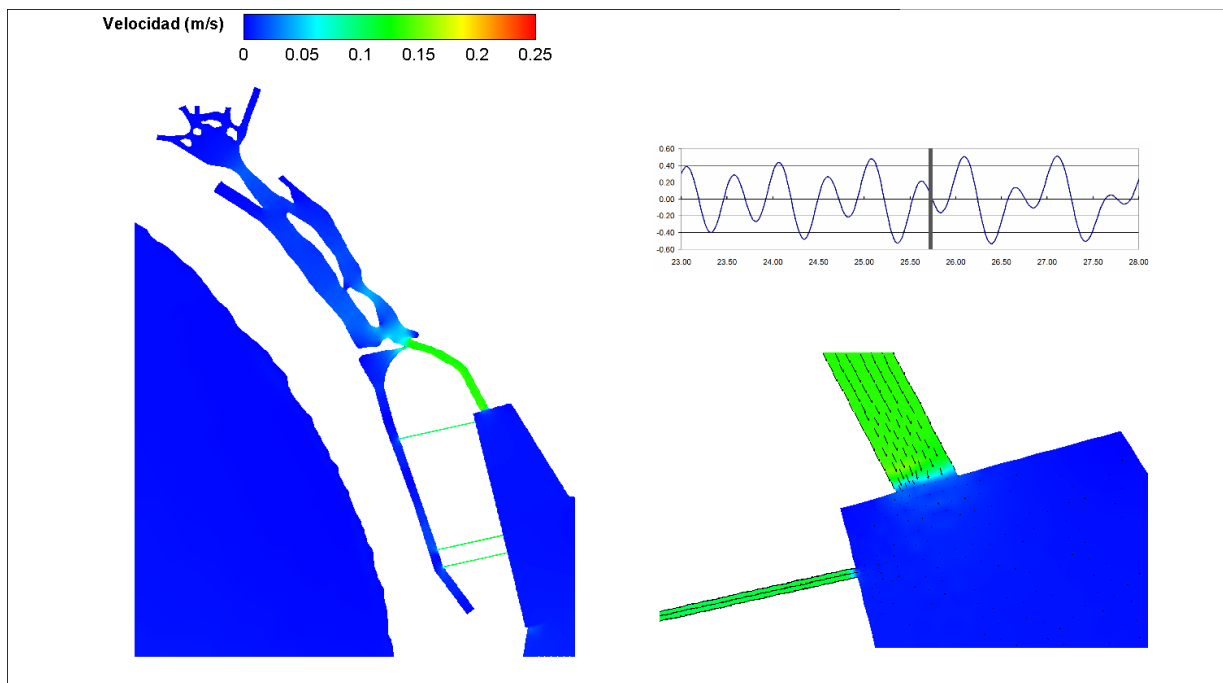


Figura 5.73 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 17:00 h

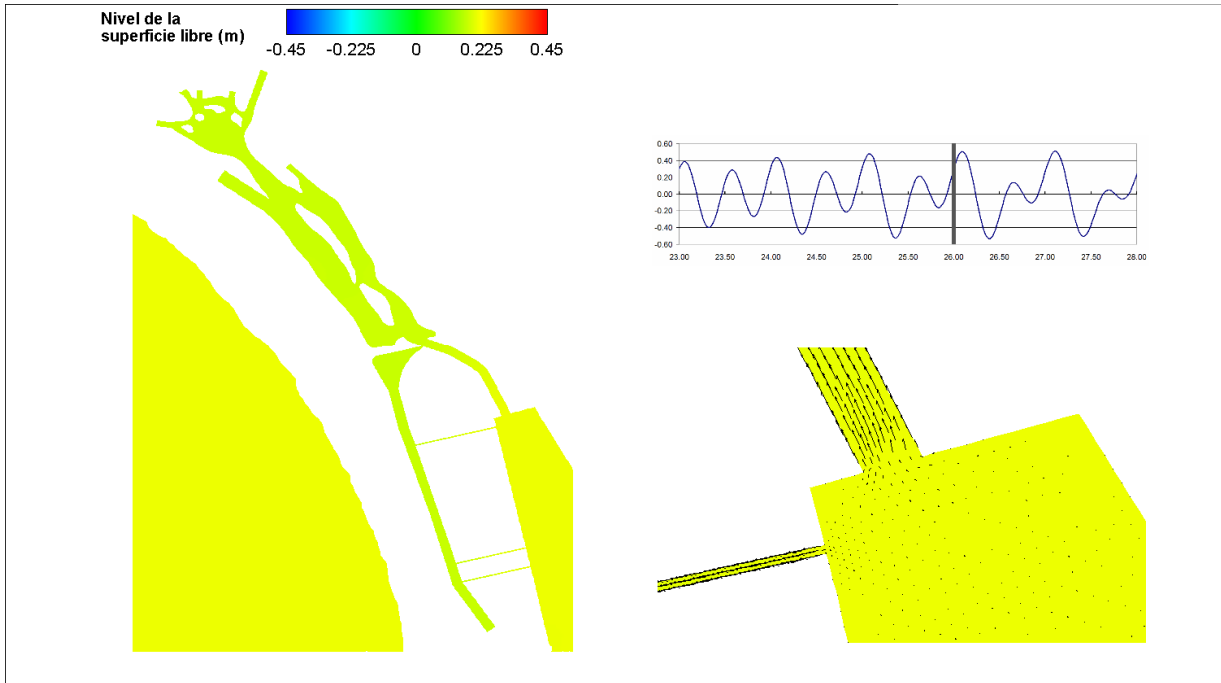


Figura 5.74 Elevación de la superficie libre en el puerto. 25 abril 2009, 23:30 h

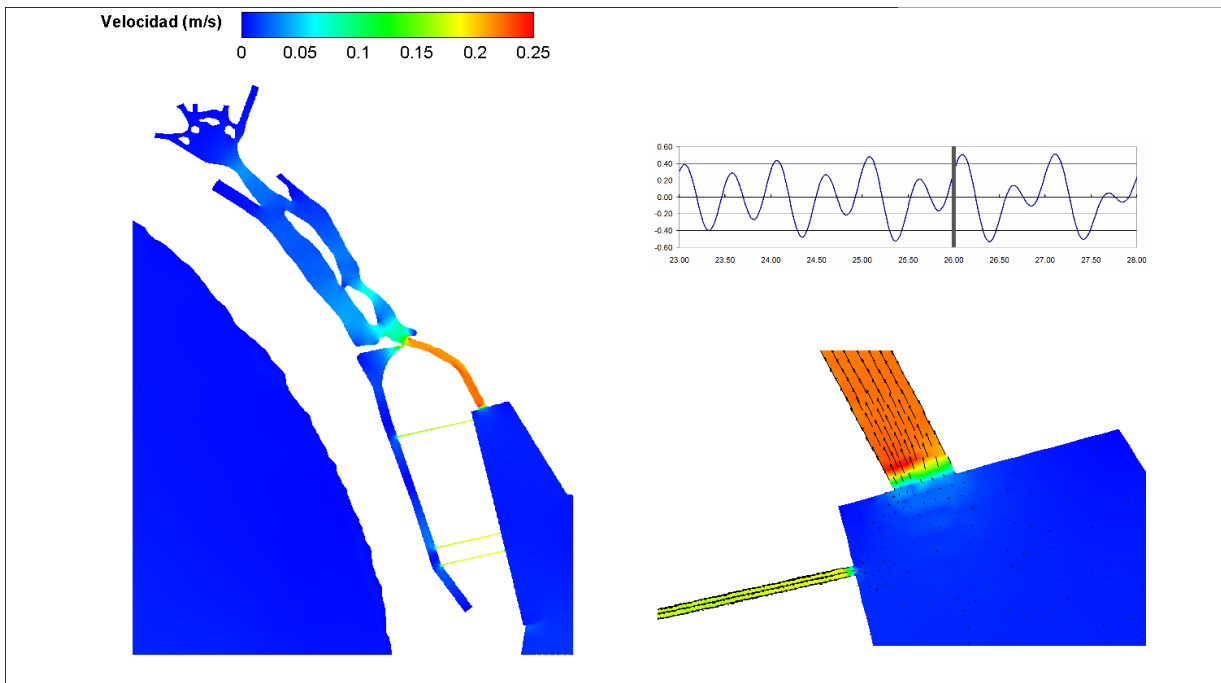


Figura 5.75 Campo de velocidades. 25 abril 2009, 23:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

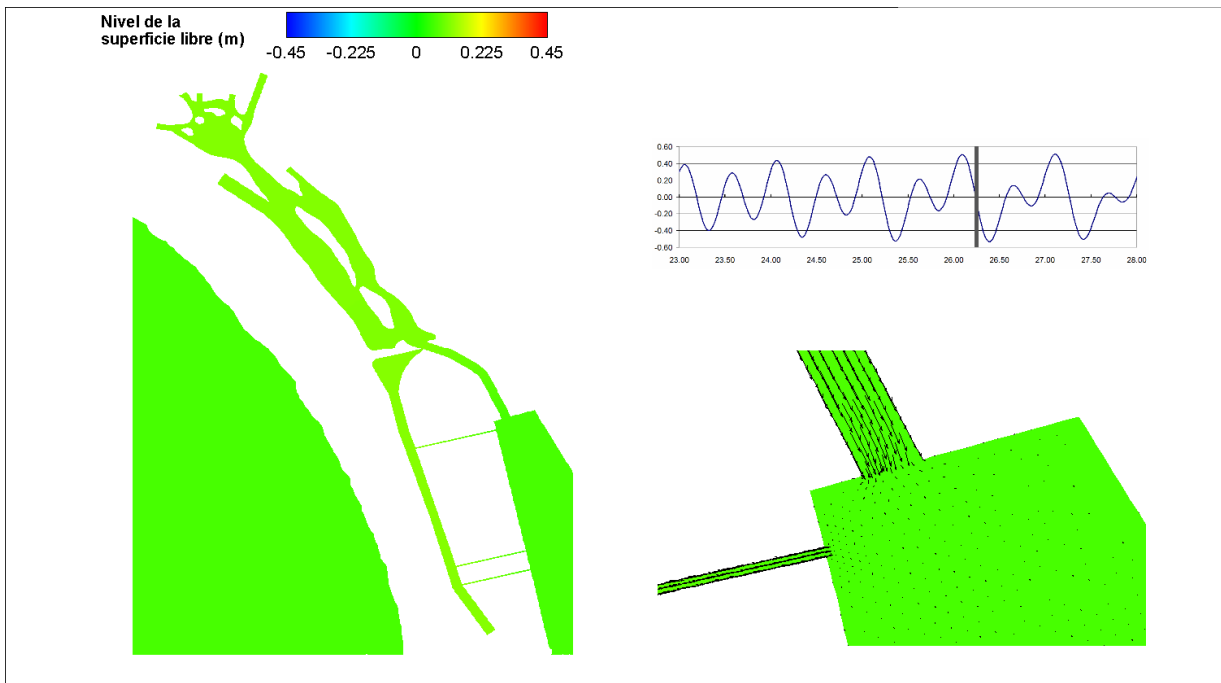


Figura 5.76 Elevación de la superficie libre en el puerto. 26 abril 2009, 05:30 h

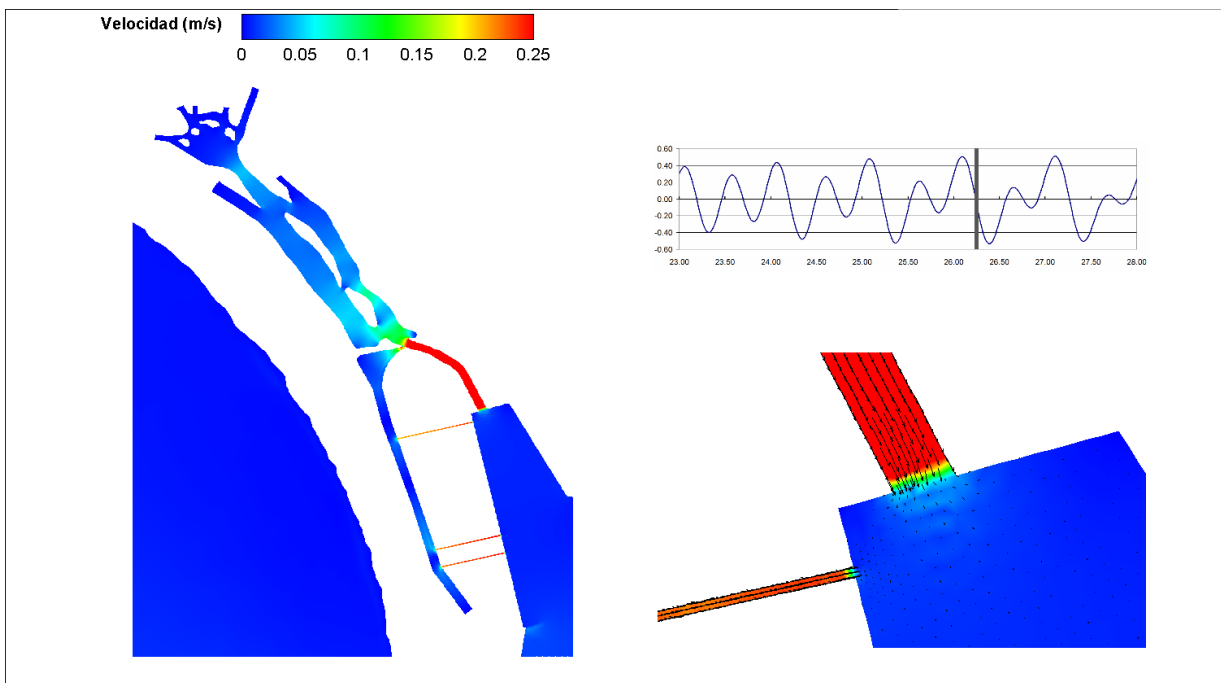


Figura 5.77 Campo de velocidades. 26 abril 2009, 05:30 h

b) Mareas muertas

Para el periodo simulado, puede observarse que la franja ecológica y la laguna de Las Garzas responden adecuadamente a la variación de la marea (figura 5.78 a figura 5.96, numeración par).

Aunque la amplitud de la marea es menor que en mareas vivas, tanto en el canal de comunicación como en los drenes ecológicos se presentan velocidades importantes en condiciones de flujo y reflujó. En condiciones de flujo, las velocidades máximas registradas en el canal fueron del orden de los 20 cm/s, y en los drenes ecológicos del orden de los 18 cm/s (figura 5.97). Por otra parte, las velocidades máximas alcanzadas en el canal de comunicación en condiciones de reflujó, fueron del orden de los 18 cm/s, mientras que en los drenes ecológicos del orden de los 15 cm/s (figura 5.95).

La zona norte de la laguna de las garzas sigue manteniendo una dinámica muy pobre, por lo que sigue siendo una zona probable de acumulación de sedimentos o de pobre mezclado.

Al igual que en mareas vivas, la geometría del canal propuesta por API manzanillo, así como los drenes ecológicos, permiten el intercambio de agua en la Laguna de las Garzas y en la franja ecológica.

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

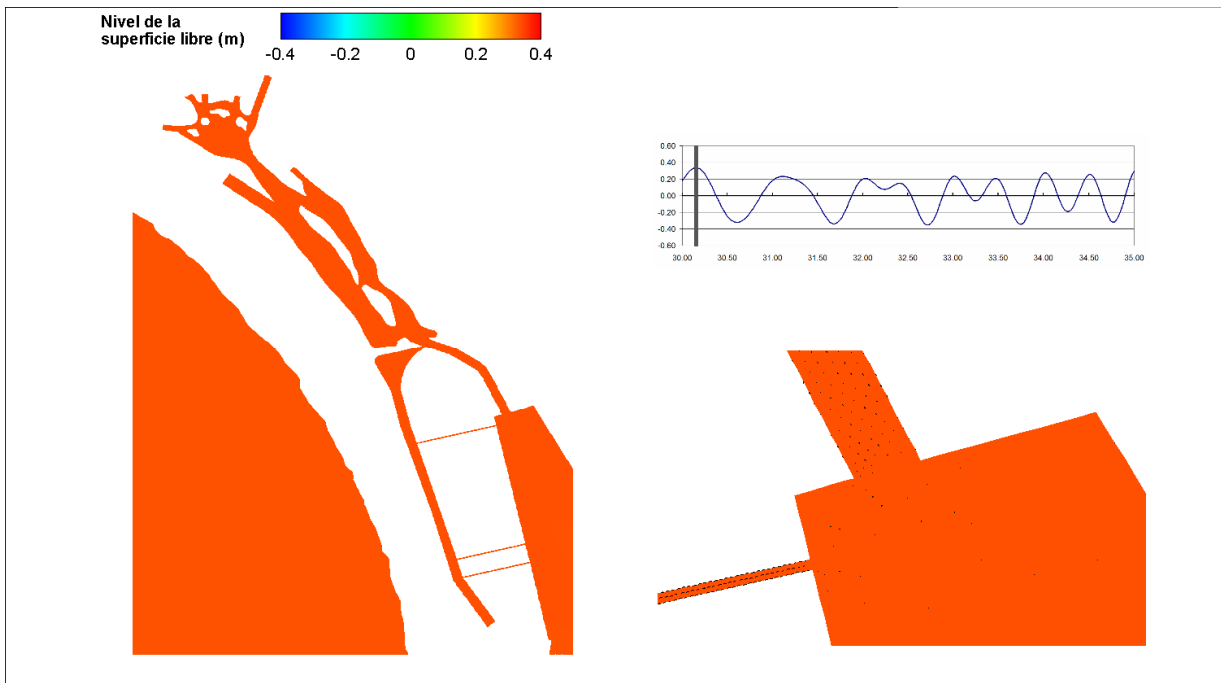


Figura 5.78 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 04:30 h

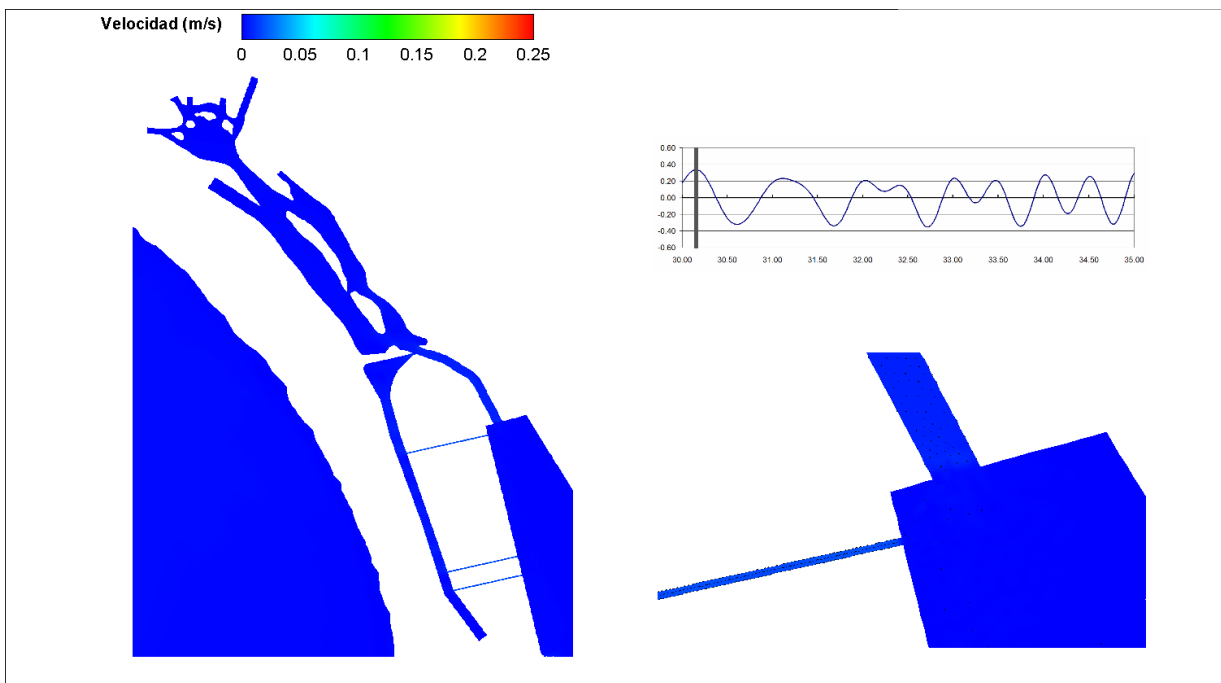


Figura 5.79 Campo de velocidades. 30 abril 2009, 04:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

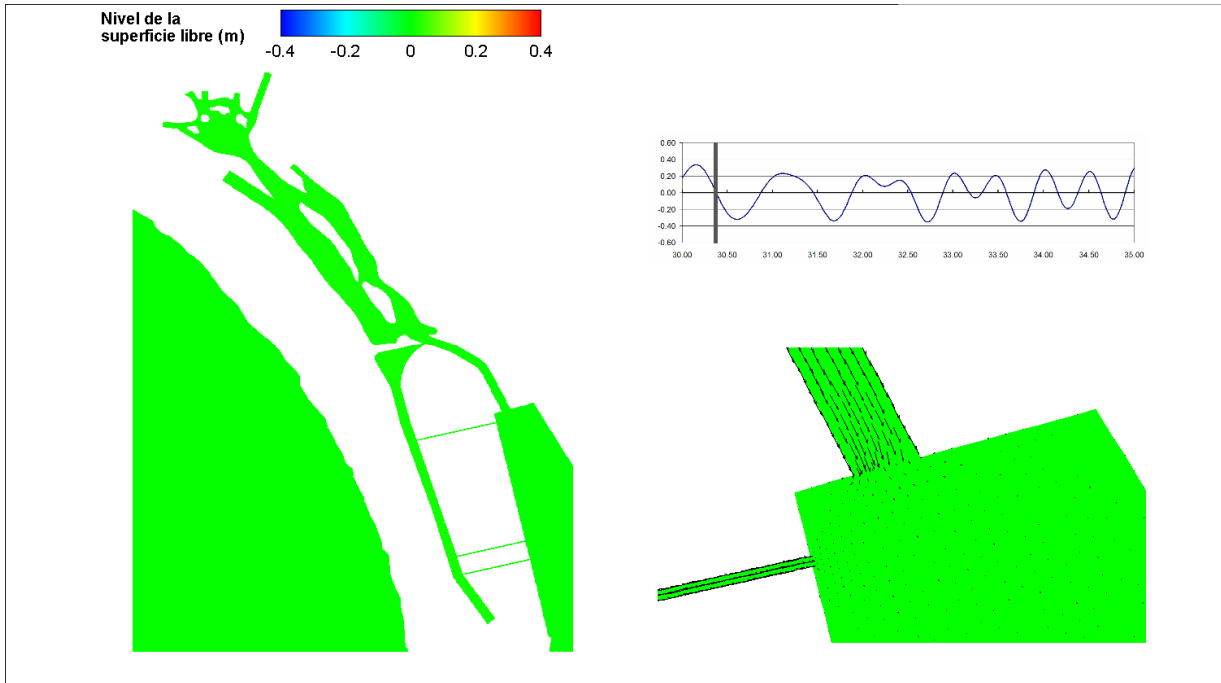


Figura 5.80 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 09:00 h

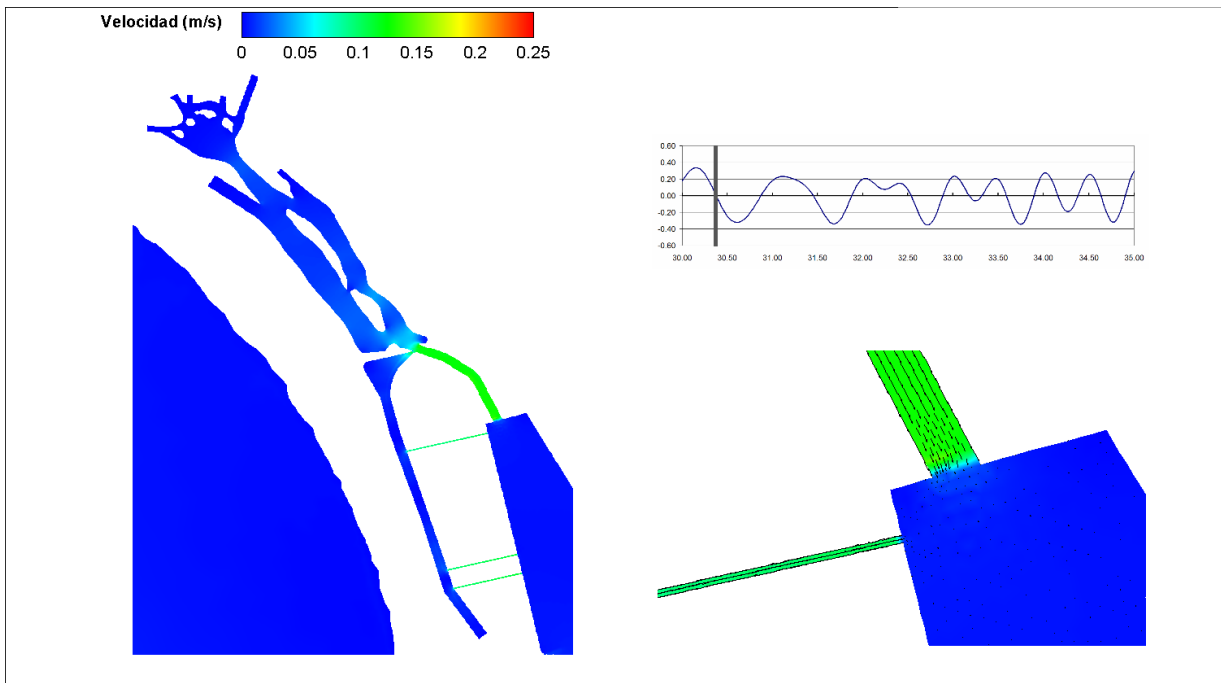


Figura 5.81 Campo de velocidades. 30 abril 2009, 09:00 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

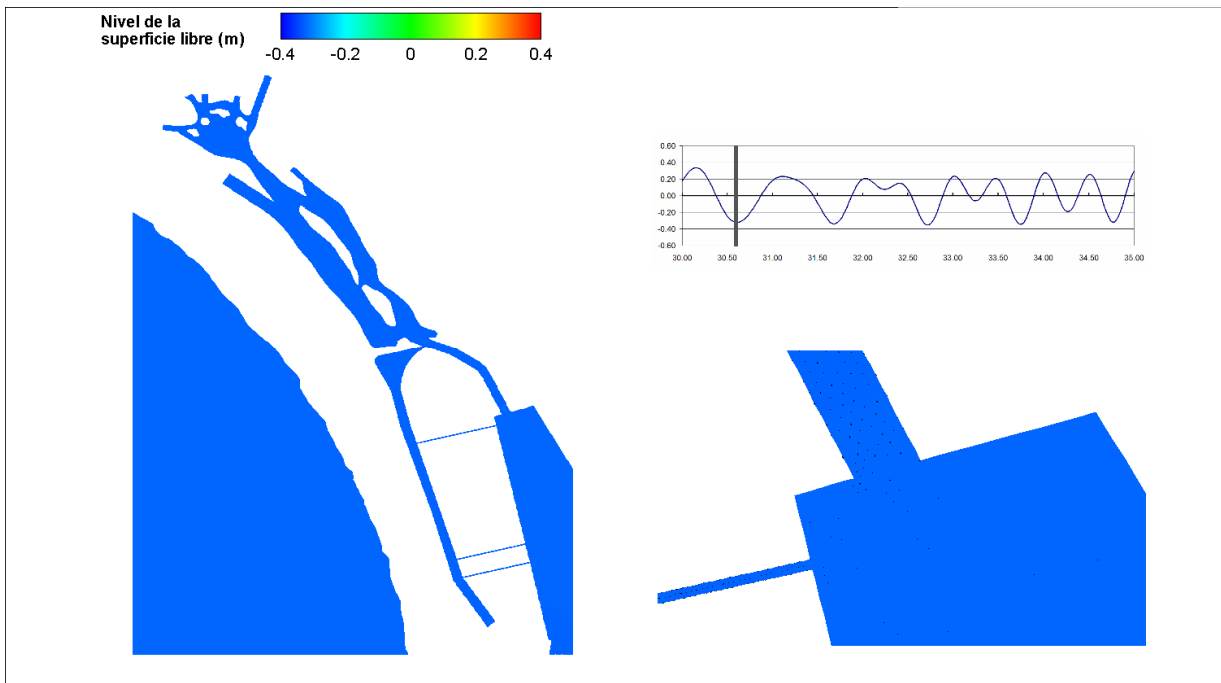


Figura 5.82 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 14:30 h

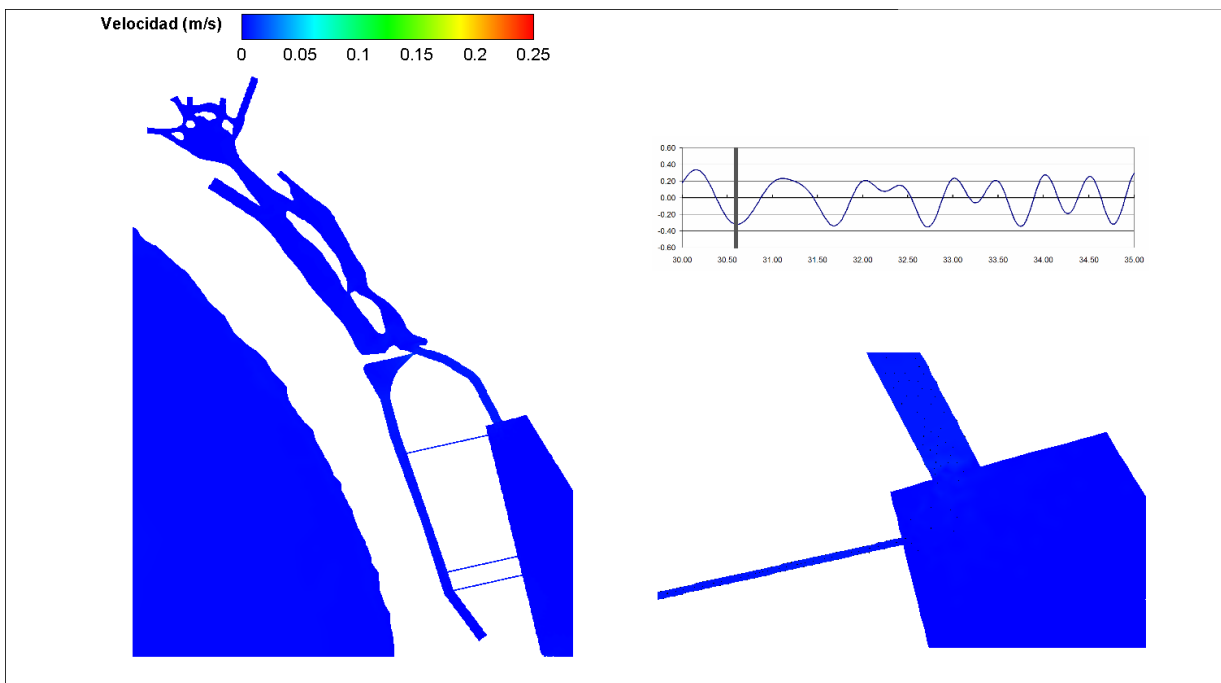


Figura 5.83 Campo de velocidades. 30 abril 2009, 14:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

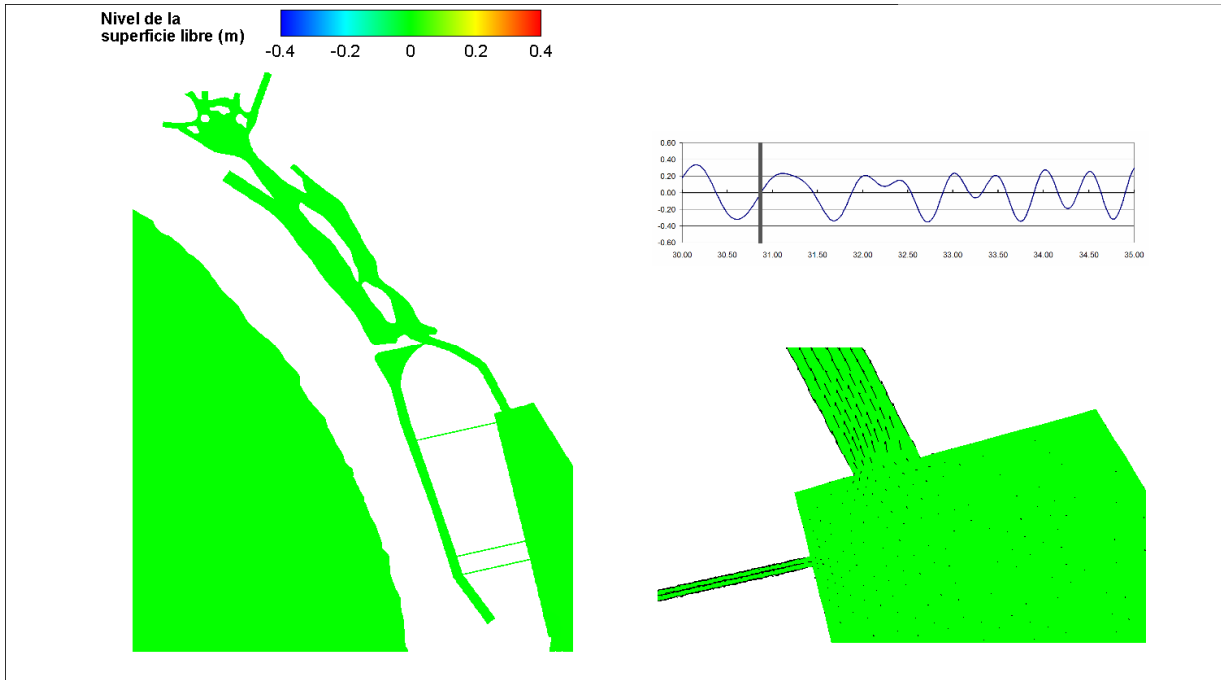


Figura 5.84 Elevación de la superficie libre en el puerto. 30 abril 2009, 21:00 h

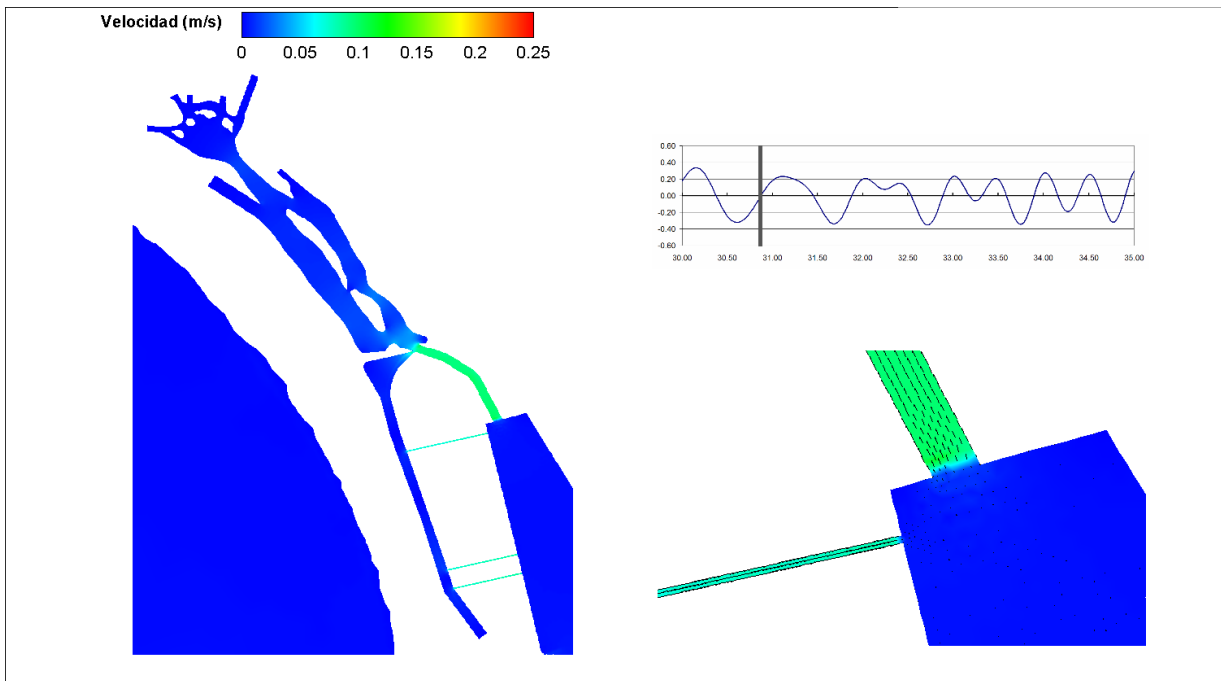


Figura 5.85 Campo de velocidades. 30 abril 2009, 21:00 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

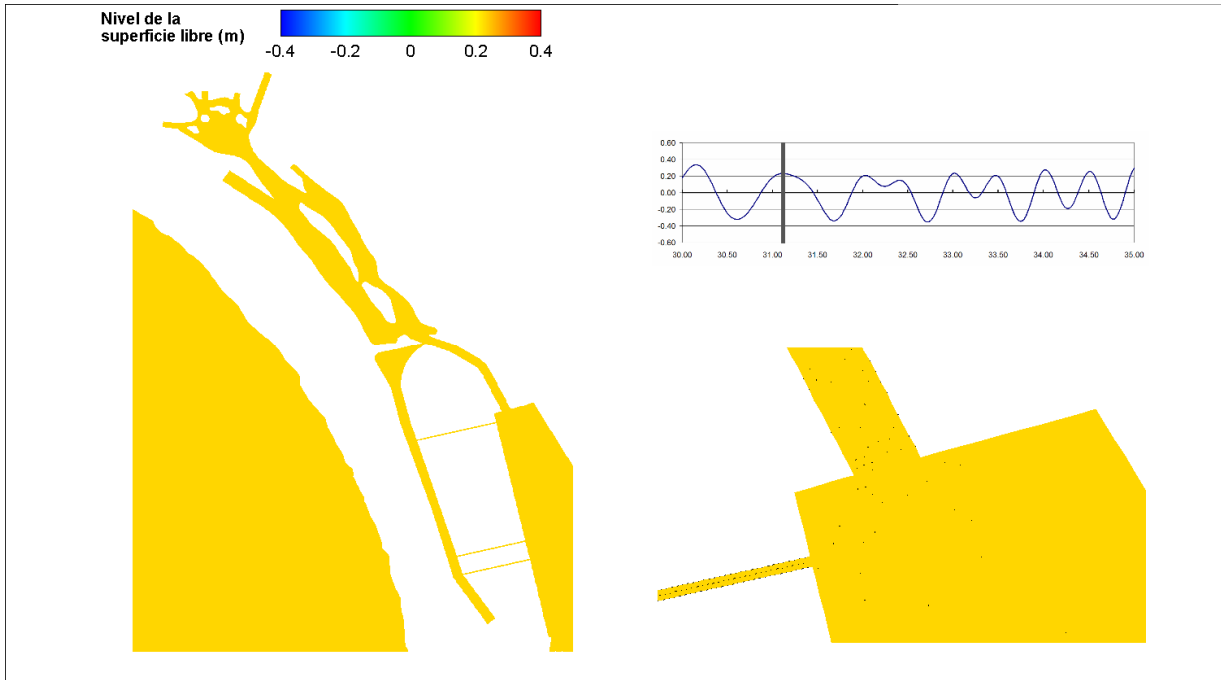


Figura 5.86 Elevación de la superficie libre en el puerto. 1 mayo 2009, 03:00 h

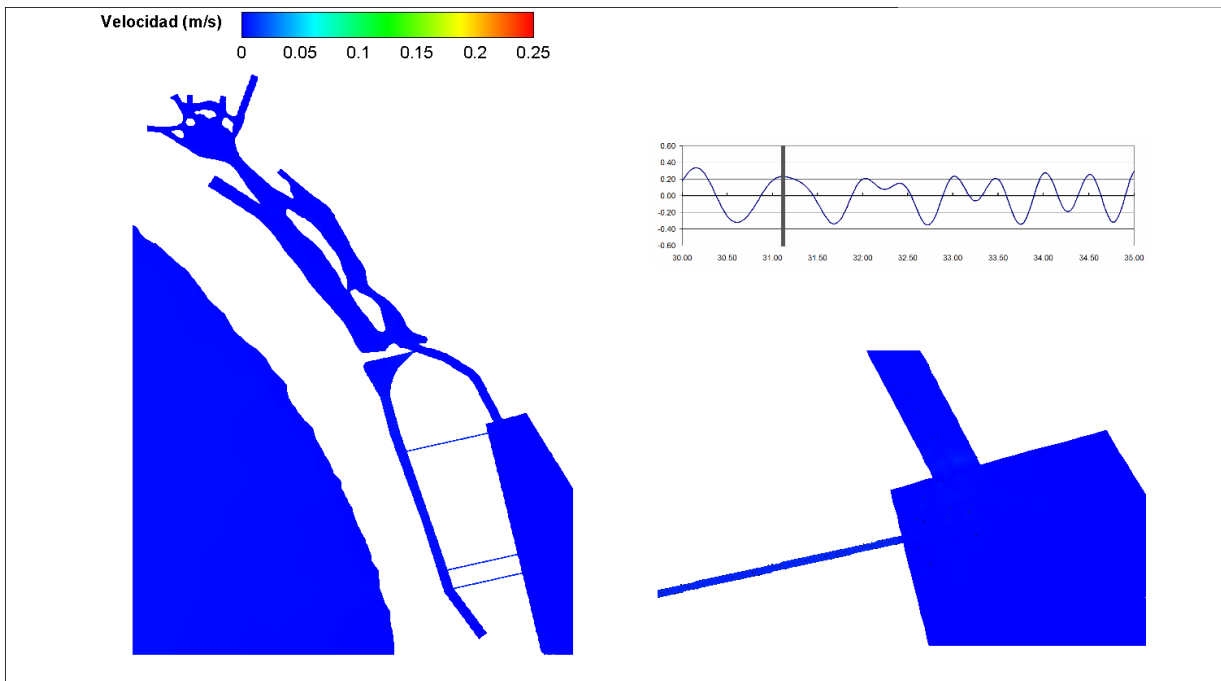


Figura 5.87 Campo de velocidades. 1 mayo 2009, 03:00 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

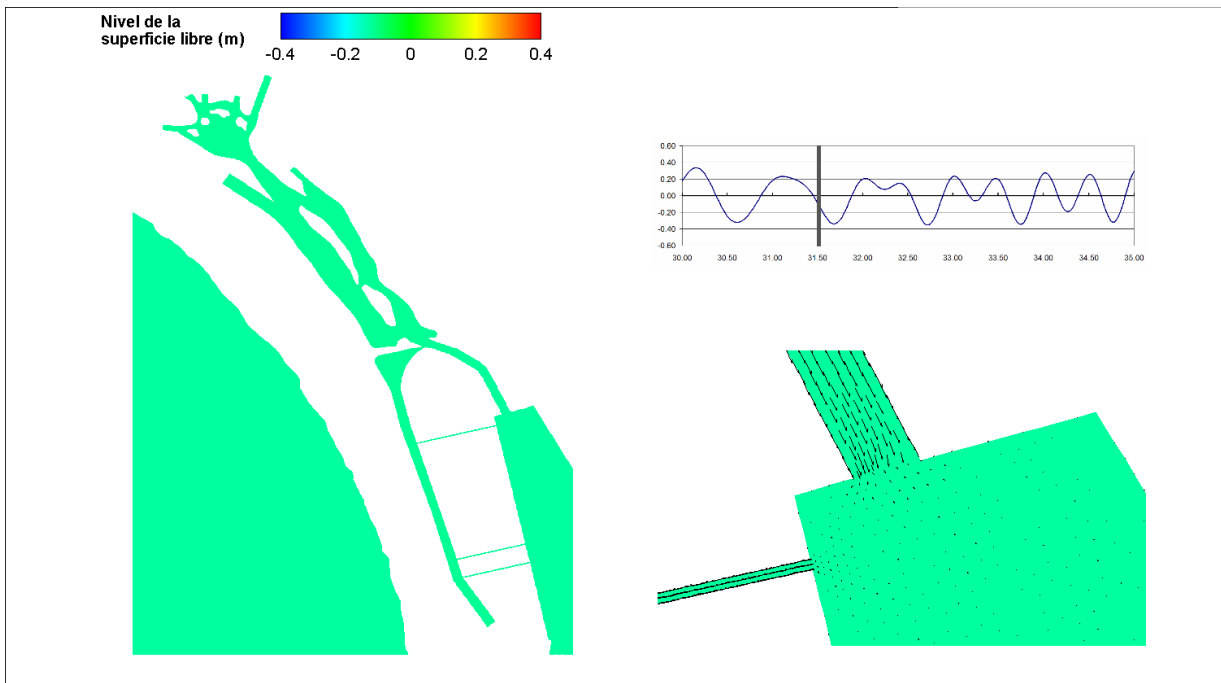


Figura 5.88 Elevación de la superficie libre en el puerto. 1 mayo 2009, 12:30 h

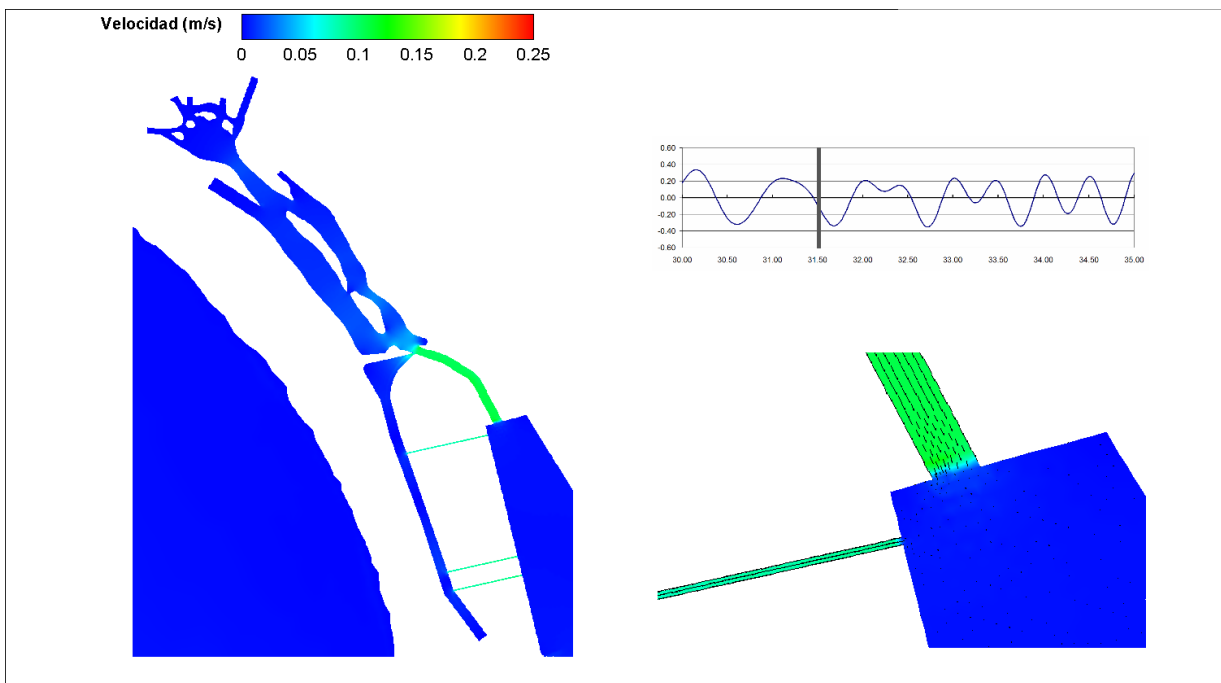


Figura 5.89 Campo de velocidades. 1 mayo 2009, 12:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

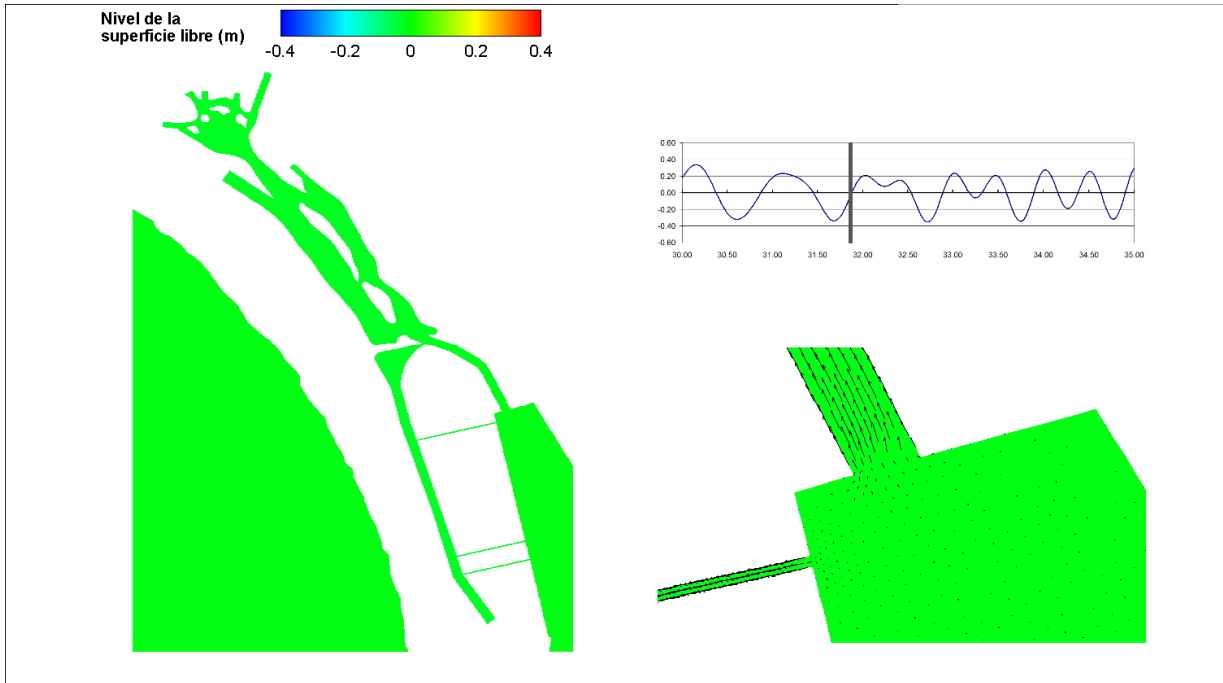


Figura 5.90 Elevación de la superficie libre en el puerto. 1 mayo 2009, 21:00 h

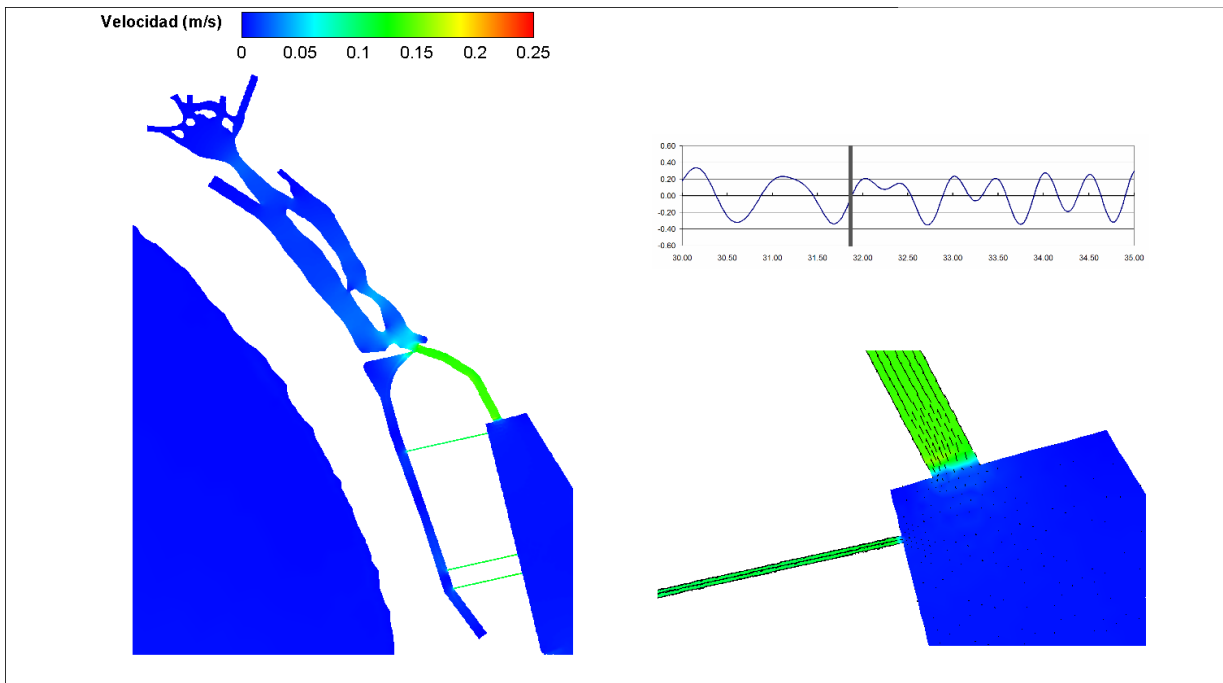


Figura 5.91 Campo de velocidades. 1 mayo 2009, 21:00 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

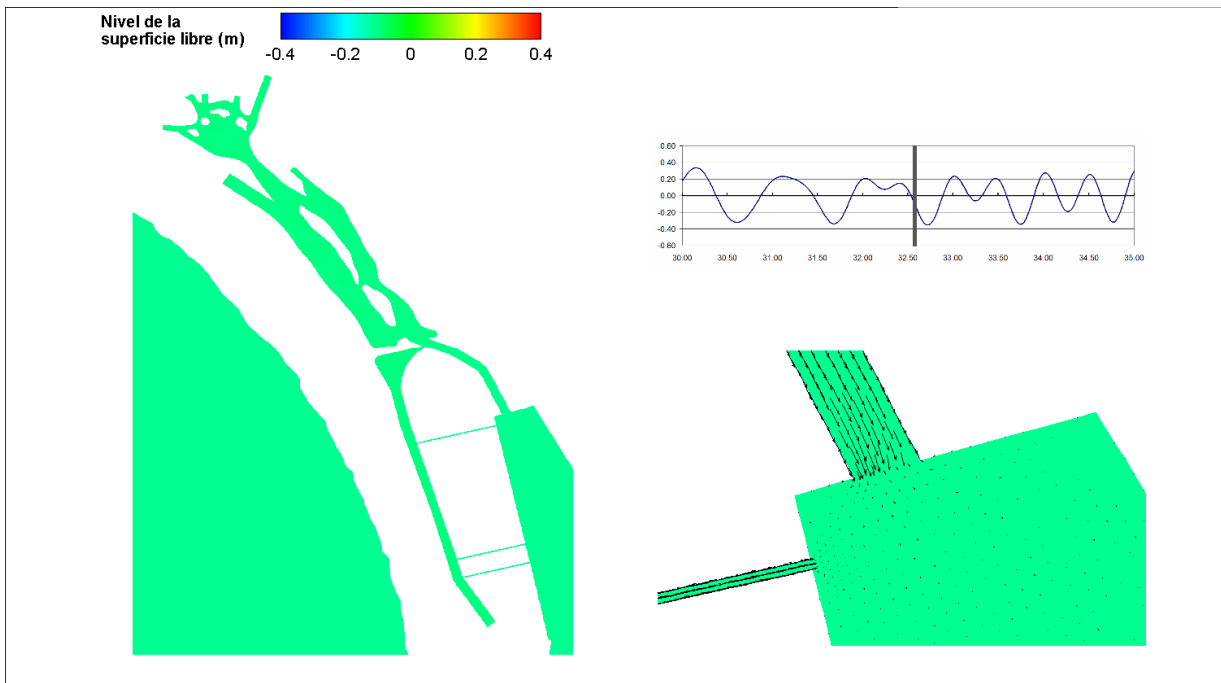


Figura 5.92 Elevación de la superficie libre en el puerto. 2 mayo 2009, 14:00 h

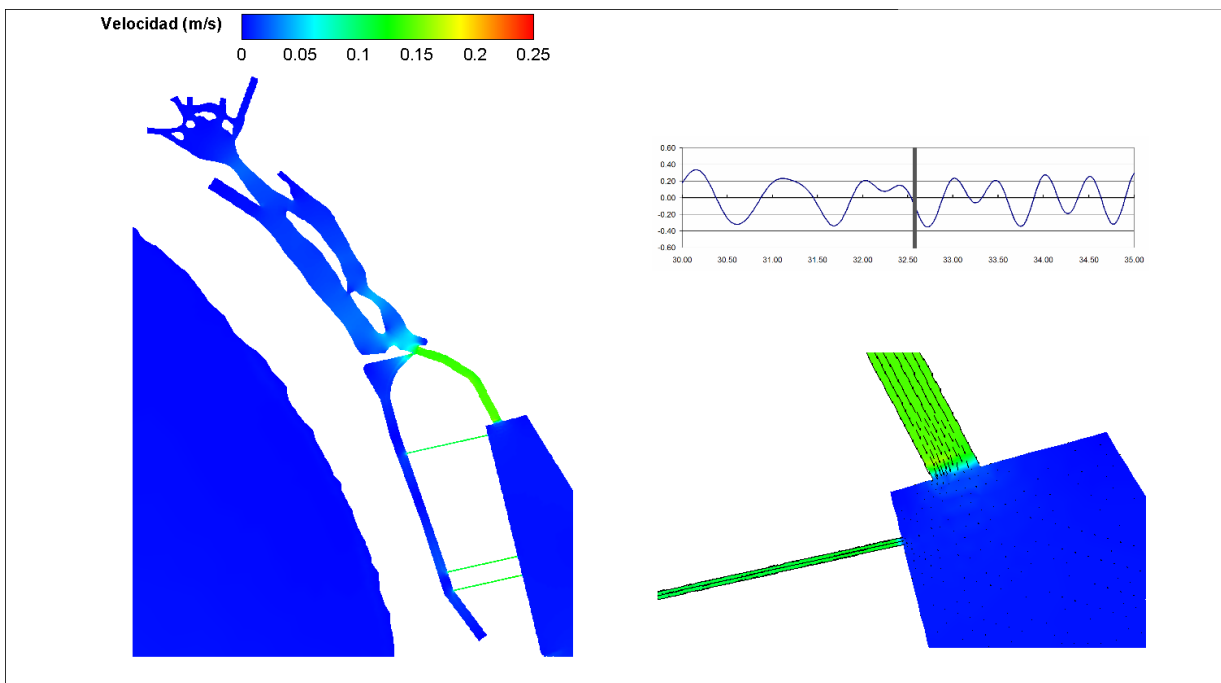


Figura 5.93 Campo de velocidades. 2 mayo 2009, 14:00 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

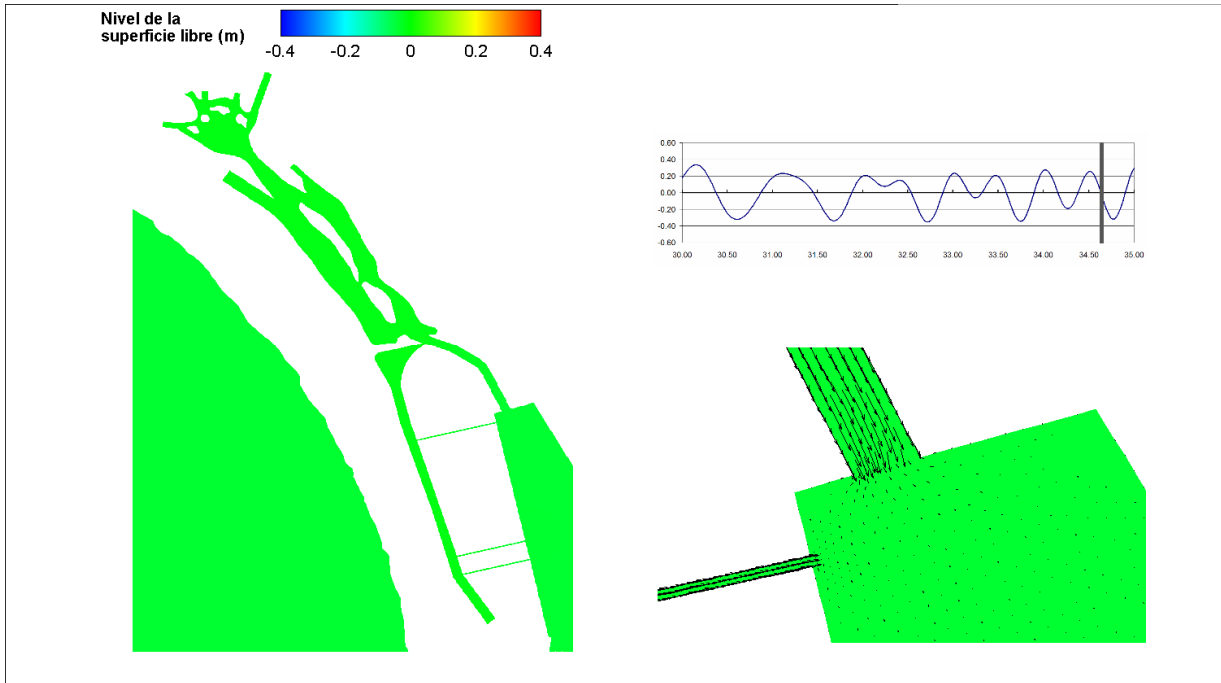


Figura 5.94 Elevación de la superficie libre en el puerto. 2 mayo 2009, 20:30 h

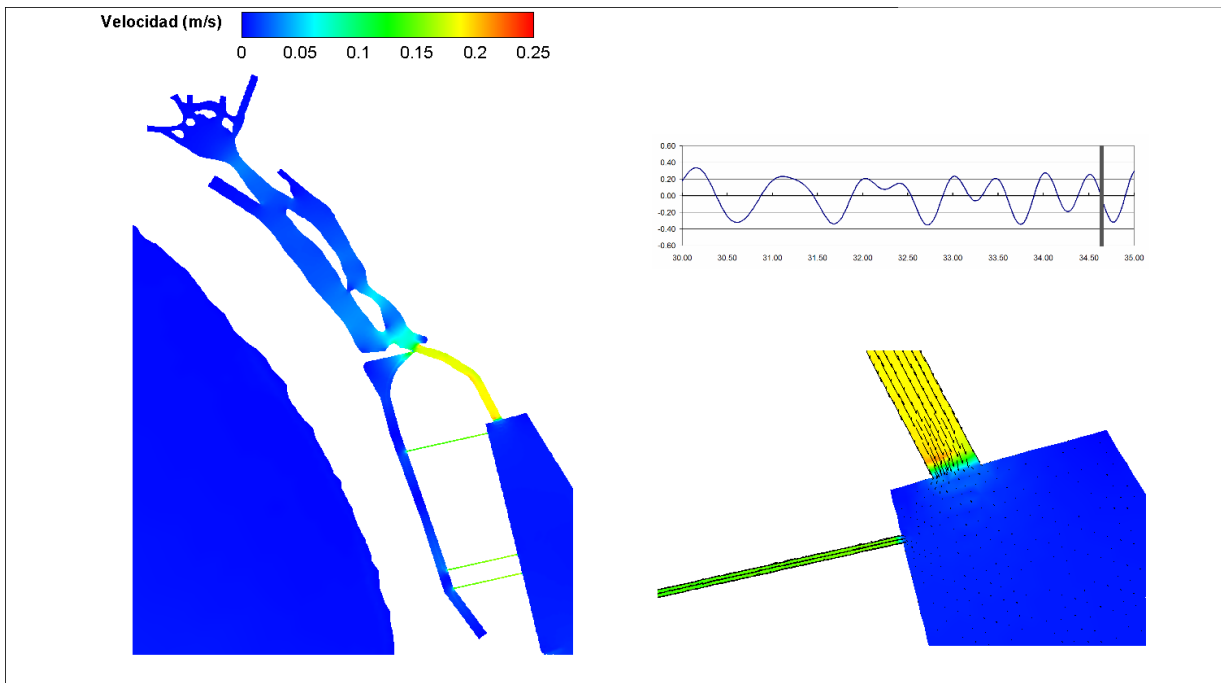


Figura 5.95 Campo de velocidades. 2 mayo 2009, 20:30 h

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

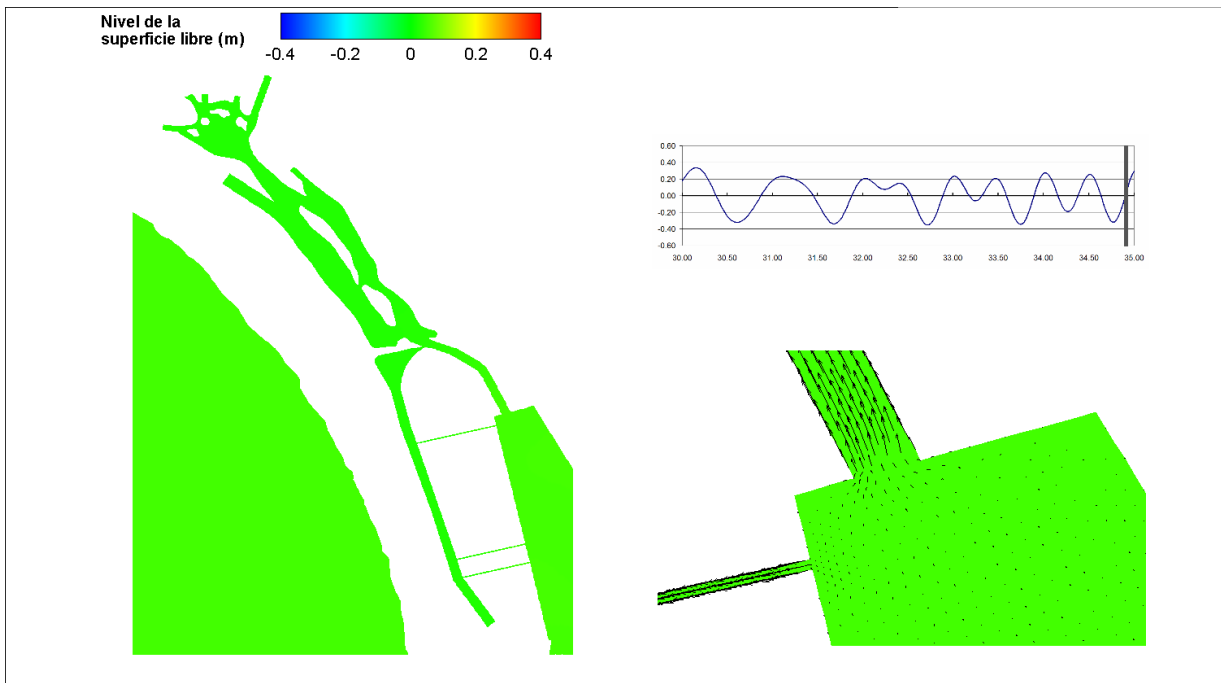


Figura 5.96 Elevación de la superficie libre en el puerto. 3 mayo 2009, 14:30 h

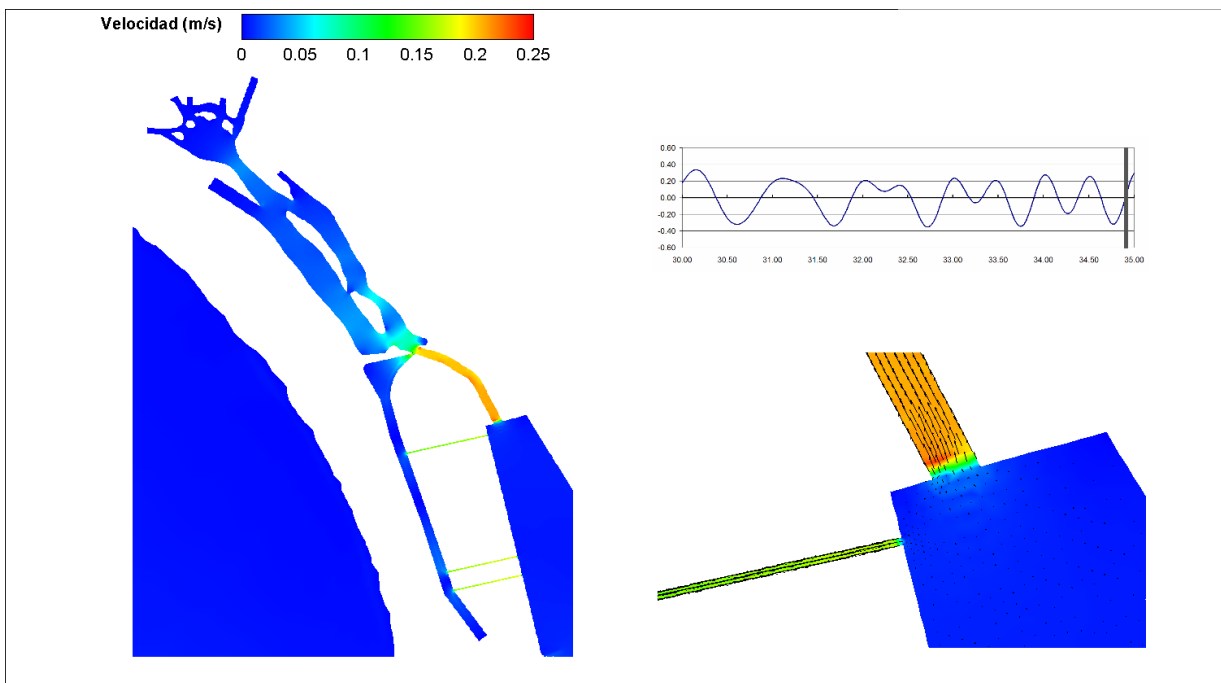


Figura 5.97 Campo de velocidades. 3 mayo 2009, 14:30 h



6. Modelación numérica de la salinidad

Para la simulación de la salinidad únicamente se tomo en cuenta la geometría de proyecto de la laguna de Las Garzas. La simulación tiene como frontera el inicio del canal de comunicación (del lado del puerto), acoplada con los resultados del modelo integrado en la vertical del inciso 5.2.

Las simulaciones se llevaron a cabo mediante un modelo tridimensional de diferencias finitas. El dominio fue discretizado con una malla de 5.0 X 5.0 X 1.0 m de lado en x, y, z , respectivamente. Las ecuaciones utilizadas para representar la hidrodinámica fueron las siguientes:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-d}^{\eta} u dz \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\int_{-d}^{\eta} v dz \right)$$

donde u, v, w son las velocidades en x, y, z , respectivamente, P es la presión; ρ , la densidad del agua, dada por $\rho(\bar{S}, \bar{T}, \bar{P}) = \frac{\rho_0}{\left(1 - \frac{\bar{P}}{k_p}\right)}$, y η , la elevación de la superficie libre.

Para la modelación de la salinidad, se utilizo la siguiente ecuación de transporte:



$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

donde C , es la concentración de salinidad, y K_x, K_y, K_z son los coeficientes de difusión en las direcciones x, y, z , respectivamente.

Se plantearon dos escenarios de simulación, el primero considerando una concentración de salinidad inicial en la laguna de 0.0 ups, y el segundo con una concentración inicial de 34.0 ups. En ambos se consideró una descarga de 230.0 l/s de agua, de la PTR, con concentración nula de salinidad.

De la figura 6.1 a la figura 6.4 se muestran la evolución de la concentración de salinidad en el escenario 1 para 26.0, 42.48, 78.0 y 148.0 h de simulación, respectivamente. Puede observarse que después de 42.48 h de intercambio de agua la salinidad en la superficie de la laguna ya ha alcanzado las 18.0 ups (figura 6.2). A las 78.0 h de simulación, se presenta un gradiente de salinidad a lo largo del cuerpo de la Laguna de las Garzas, con concentraciones de 34.0 ups en el canal de comunicación, de 25.0 ups al centro del cuerpo de agua, y del orden de las 21.0 ups en la parte norte de la laguna (figura 6.3). Para las 148.0 h de simulación, puede observarse que en casi todo en el cuerpo de la laguna se han alcanzado concentraciones de salinidad por encima de las 30.0 ups, mientras que en el brazo en el que se consideró la descarga de la PTR, las concentraciones de salinidad son del orden de las 27.0 ups (ver figura 6.4). Puede observarse que considerar una concentración nula de salinidad en la Laguna de las Garzas en su condición de proyecto, al sexto día después de apertura del canal de comunicación con el puerto, el agua dulce será desplazada, por lo que se tendrán



condiciones similares de salinidad entre la dársena de San Pedrito y la laguna de Las Garzas.

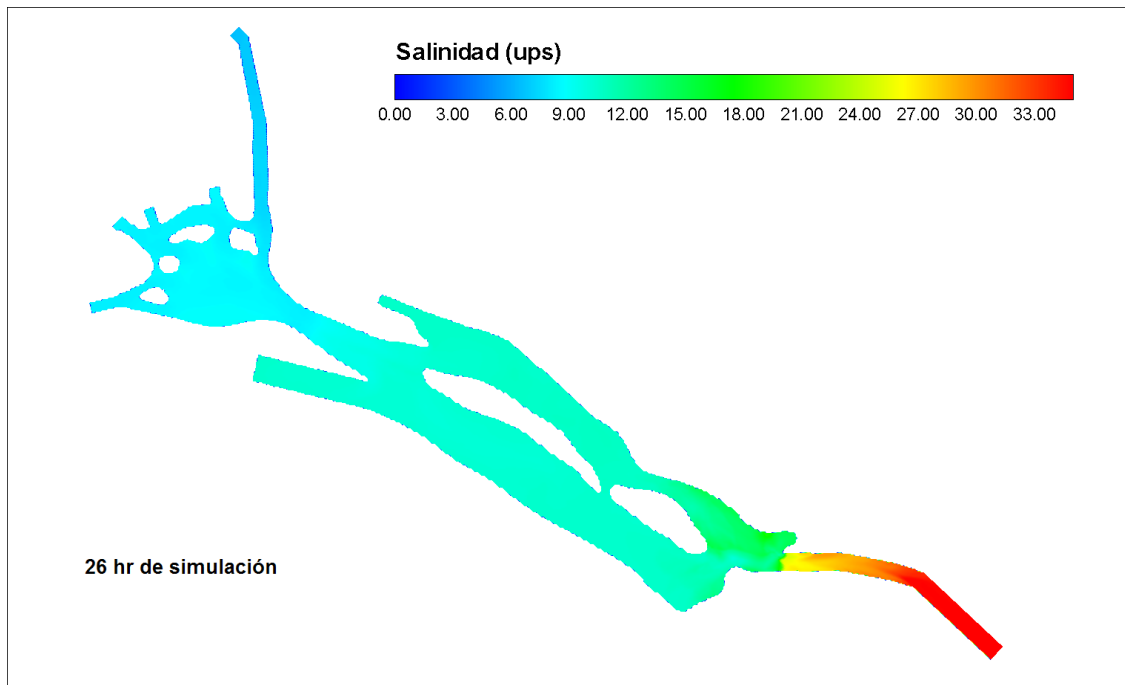


Figura 6.1 Concentración de salinidad a 26 h de simulación, escenario 1.

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

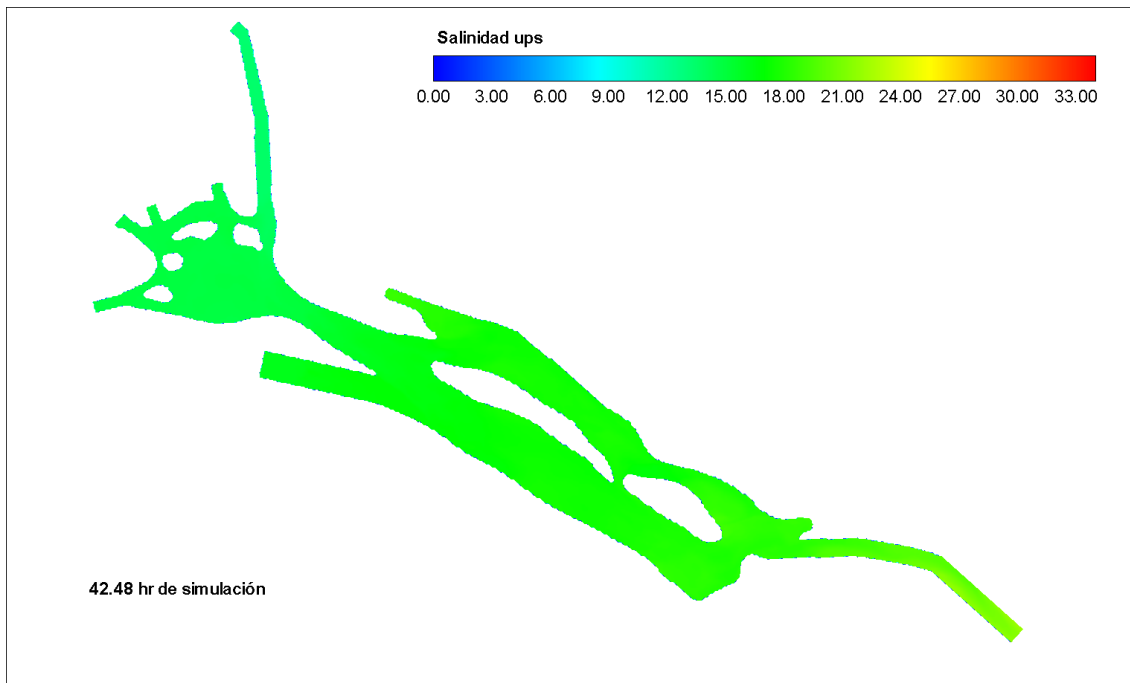


Figura 6.2 Concentración de salinidad a 42.5 h de simulación, escenario1.

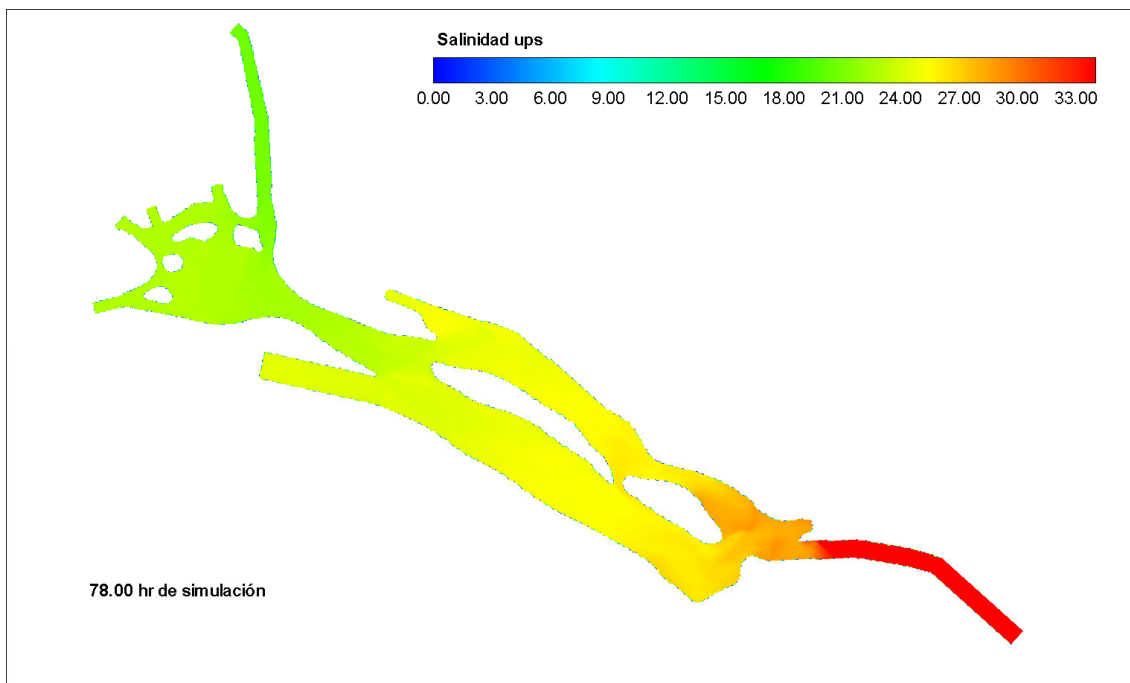


Figura 6.3 Concentración de salinidad a 78.0 h de simulación, escenario1.



Figura 6.4 Concentración de salinidad a 148.0 h de simulación, escenario1.

La figura 6.5 a la figura 6.8, muestran la evolución de la concentración de salinidad en el escenario 2 para 25.89, 42.2, 78.0 y 148.0 h de simulación, respectivamente. En este escenario, puede observarse la influencia de la descarga de la PTAR sobre la laguna de Las Garzas considerando en ella una concentración de salinidad inicial uniforme de 34.0 ups. Para aproximadamente 26.0 h de simulación puede observarse que la salinidad ha disminuido en la parte norte de la laguna, zona donde se encuentran las cuatro islas (33.0 ups), también puede observarse la disminución de la salinidad en el brazo sobre el que se consideró la descarga de la PTAR (figura 6.5). Para las 42.0 h de simulación, la descarga de la PTAR ya ha disminuido la salinidad en una unidad ups hasta la zona donde se encuentra la isla más larga y un poco menos en los costados de dicha isla (figura 6.6). A las 78.0 h de simulación, puede observarse como va penetrando el frente de agua salada (35.0 ups) y cómo va disminuyendo la salinidad alrededor de la isla más larga de la laguna (figura 6.7). A las 148.0 h de simulación, puede observarse la influencia de la descarga de



la PTAR hasta el canal de comunicación, bajando en media unidad ups la salinidad de esa zona, mientras que en la zona norte donde se encuentran las cuatro islas, la salinidad es del orden de las 33.5 ups (figura 6.8). Después de 148 h la salinidad en casi toda la laguna se encuentra por encima de las 31.0 ups, mientras que en el brazo donde descarga la PTAR la salinidad se encuentra del orden de las 29.5 ups.

La figura 6.9 muestra una comparativa entre los escenarios 1 y 2 para las 148.0 h de simulación, y la diferencia máxima de concentraciones entre ambos escenarios es del orden de las cuatro ups. El resultado de ambos escenarios a las 148.0 h de simulación, puede tomarse para establecer un rango de salinidades que tendría la Laguna de las Garzas bajo esas condiciones de descarga de la PTAR.

Por otro parte, es importante señalar que el volumen de agua que entra a la laguna por el lado del puerto es mucho mayor que el volumen que entra debido a la descarga de la PTAR. Por lo que era de esperarse que la salinidad al interior de la laguna sean del orden de la salinidad del agua de mar.

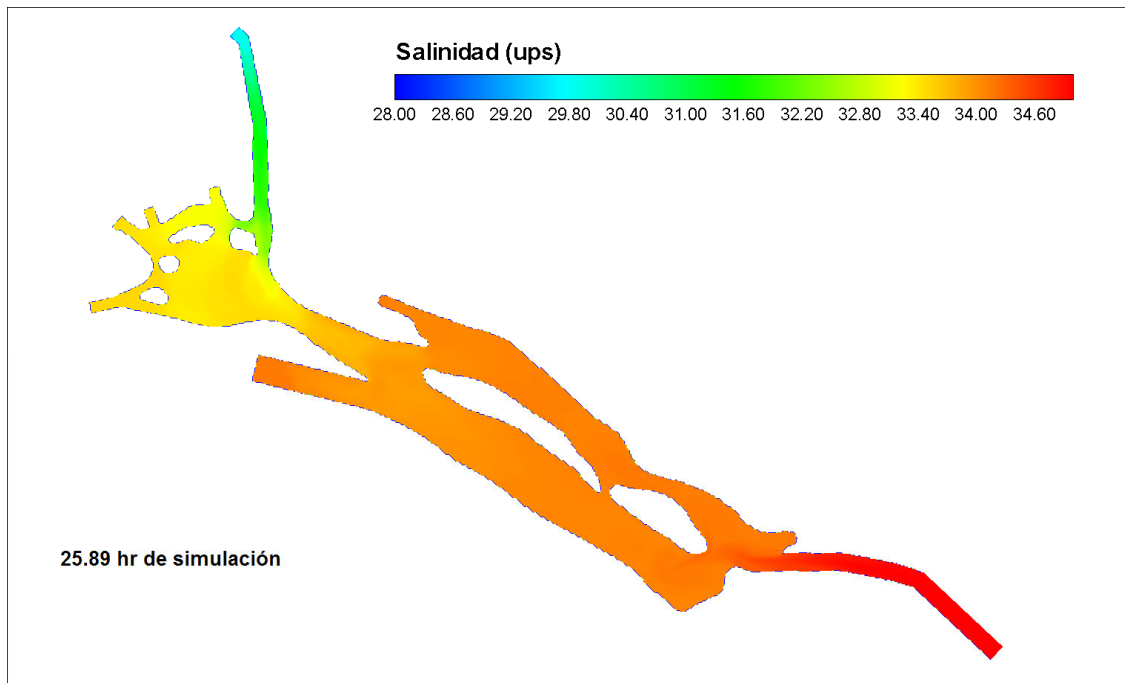


Figura 6.5 Concentración de salinidad a 26 h de simulación, escenario 2.

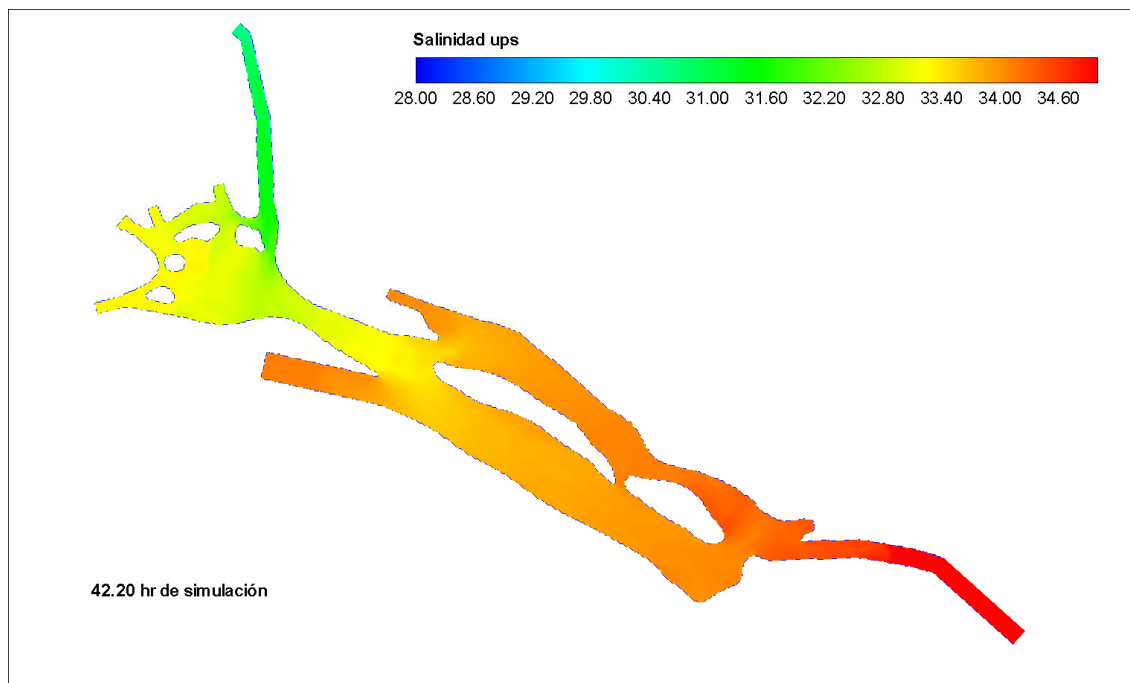


Figura 6.6 Concentración de salinidad a 42 h de simulación, escenario 2.

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima

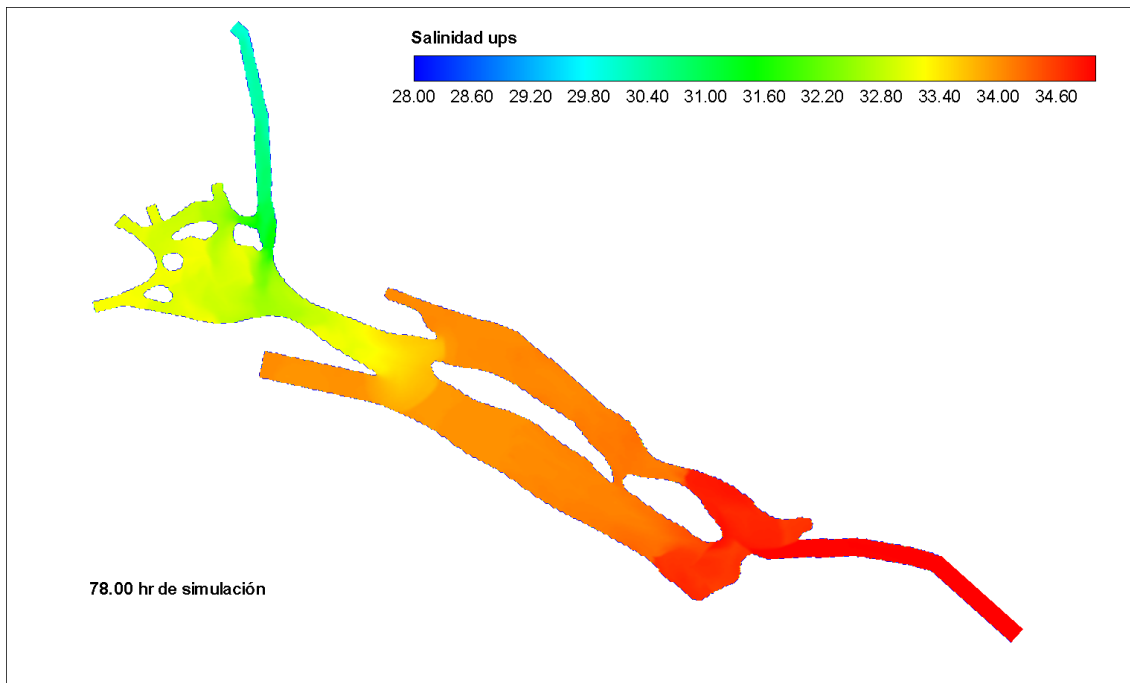


Figura 6.7 Concentración de salinidad a 78.0 h de simulación, escenario2.

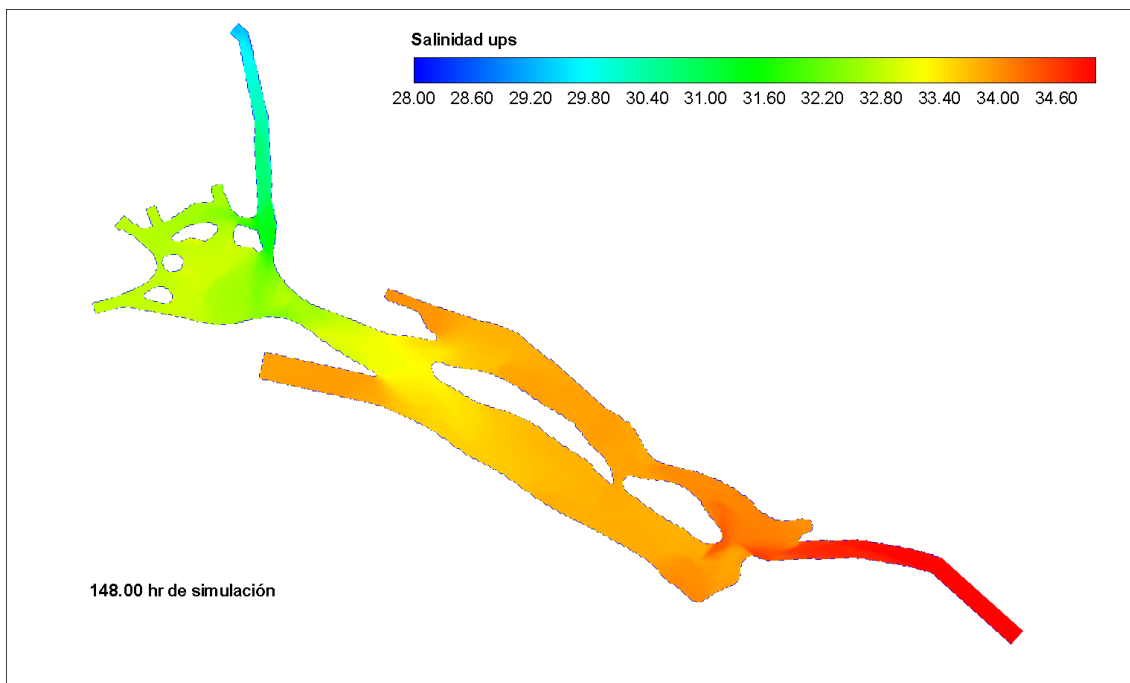
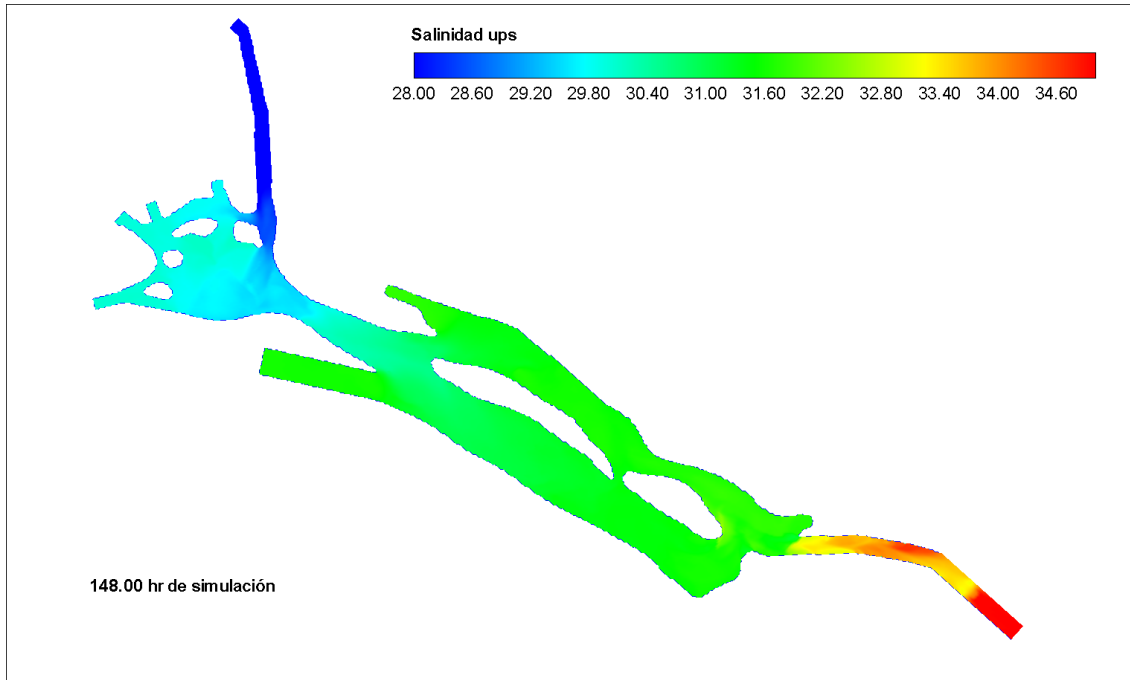
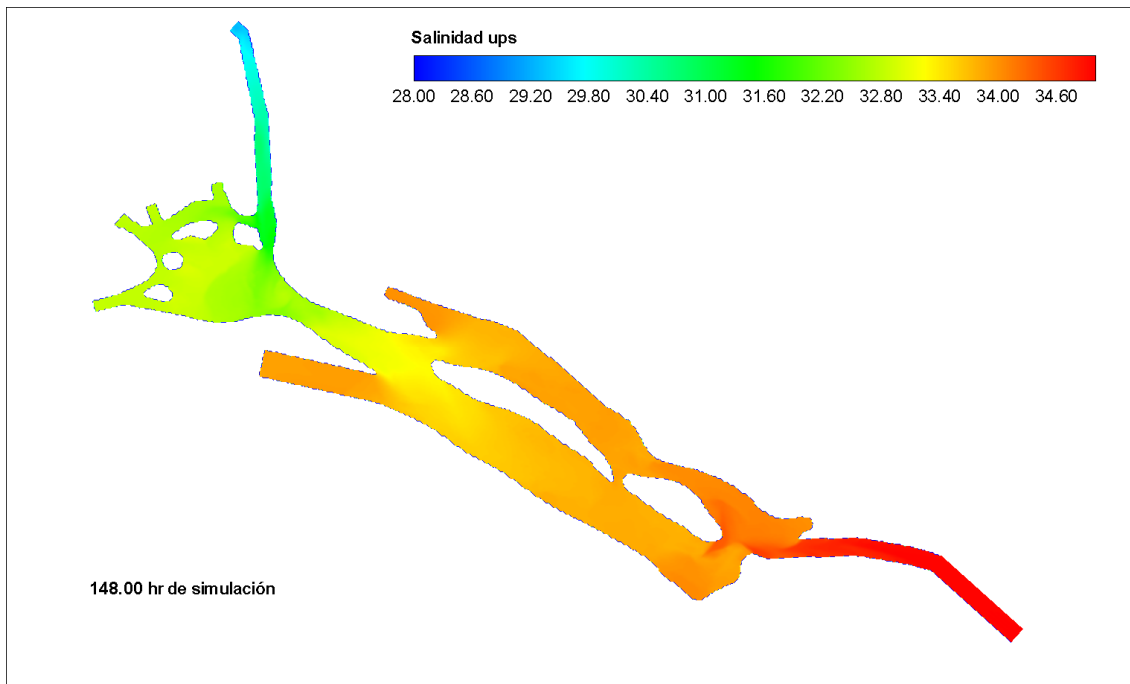


Figura 6.8 Concentración de salinidad a 148.0 h de simulación, escenario2.

Estudio con el análisis de escenarios de modelación de la unión de la laguna de Las Garzas con la dársena de San Pedrito en Manzanillo, Colima



a) Escenario 1 a 148.0 h de simulación



b) Escenario 2 a 148.0 hr de simulación

Figura 6.9 Comparativa de los escenarios 1 y 2 a 148.0 h de simulación.

Finalmente, como complemento a los dos escenarios planteados anteriormente, se calculó el tiempo de residencia teórico para la laguna de Las Garzas mediante la siguiente 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 en el sistema; T_m el periodo de la marea es igual a ciclo de marea (24.83 h) para este estudio; P_m , el prisma de marea.

Como el prisma de marea es diferente en el tiempo, en la figura 6.10 se muestran los tiempos de residencia calculados en base a las pleamares consecutivas durante el tiempo de simulación. Los resultados obtenidos con la ecuación anterior, establecen que el tiempo de residencia teórico promedio es del orden de las 105 h, un tiempo ligeramente menor al obtenido por el cambio total de la masa de agua en el escenario 1 anterior.

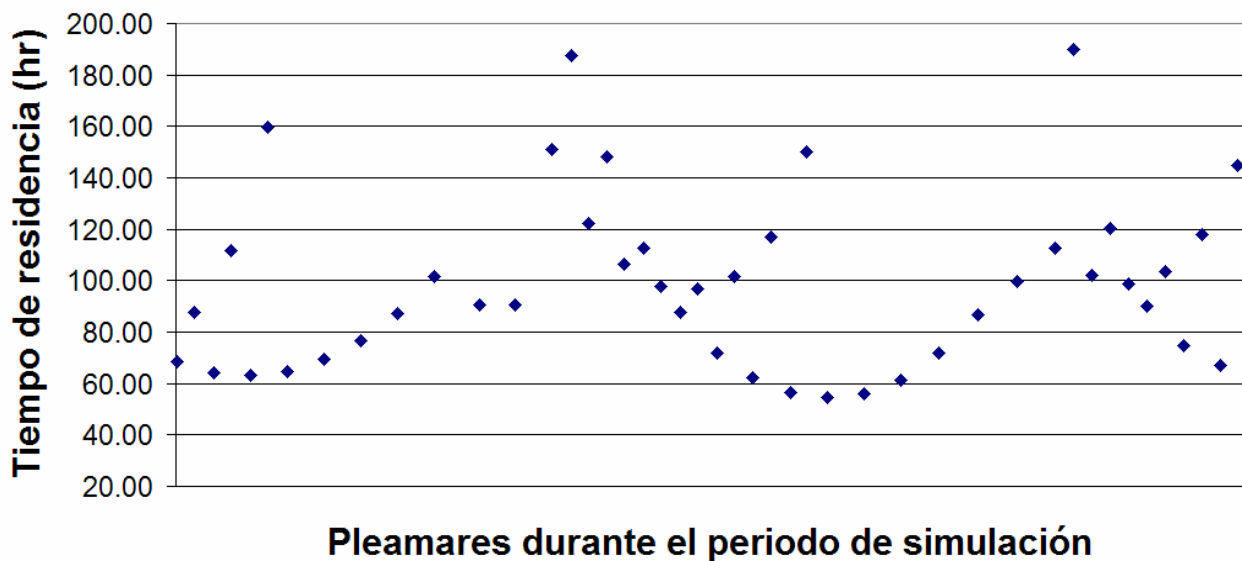


Figura 6.10 Tiempo de residencia teórico calculado para varias pleamares.



7. Conclusiones

Como parte de la ampliación del Puerto de Manzanillo y rehabilitación de la laguna de Las Garzas, se llevo a acabo la modelación numérica de la dársena, bajo condiciones actuales y bajo condiciones de proyecto. En zonas costeras el principal forzamiento en la circulación es la marea por lo que en las modelaciones se consideró este mecanismo de forzamiento.

Para establecer cuantitativamente las condiciones ambientales, que prevalecen en el puerto, se llevo a cabo una campaña de mediciones de corrientes y del campo de masa. Las mediciones se llevaron a cabo durante el periodo de mareas vivas y que comprendió del 22 al 25 de abril de 2009. Para las mediciones de corrientes se utilizó dos ADCP (de 1.5 MHz y de multifrecuencia, marca Sontek) montados en un catamarán y un ADCP (de 0.6 MHz marca RD&Instruments) anclado en la entrada del puerto a 15 m de profundidad. Como complemento a las mediciones con los perfiladores se utilizó una serie de flotadores lagrangeanos que describen la trayectoria de la corriente. El campo de masa se determinó a través de una sonda CTD con lances al interior del puerto y en la Bahía de Manzanillo.

Aunque las mediciones de corrientes y de CTD abarcaron un periodo corto de medición, los datos son de calidad y describen en forma muy detallada la hidrodinámica del puerto. Los resultados cuantitativos permitieron verificar los resultados de la modelación bajo las condiciones actuales del puerto. Los resultados más relevantes de las mediciones indican la presencia de una fuerte estructura vertical o gradiente en la velocidad y en el campo de masa, al interior del puerto. En la entrada al puerto las mediciones indican una fuerte estructura vertical bien definida de las corrientes con flujo en dos capas. Esto indica que el comportamiento del puerto, durante las mediciones, es baroclínico. Para las modelaciones se consideraron condiciones promedio de la circulación debido a que el modelo es



integrado en la vertical y por lo tanto solo representa las condiciones promedios que prevalecen en la dársena.

Para la modelación numérica de la circulación se utilizó el modelo ADCIRC-2DDI el cual es un modelo, en dos dimensiones integrado en la vertical, que se resuelven las ecuaciones de aguas someras mediante el método de elemento finito. Para la modelación se elaboró una malla numérica y fue forzado por las principales componentes de marea en la frontera del modelo.

Los resultados de la modelaciones numérica de la marea para las condiciones actuales son comparados con los resultados de las mediciones. La comparación muestra que los resultados son bastante satisfactorios y corresponden tanto en amplitud como en fase. Asimismo, se analiza el comportamiento de la circulación para mareas vivas y mareas muertas al interior del puerto.

Para las condiciones de proyecto las modelaciones se extendieron para incluir la laguna de Las Garzas y una serie de canales que permitirán el crecimiento del manglar de una franja de 60 m entre el puerto de San Pedrito y la colonia Las Brisas. La configuración de proyecto fue proporcionada por la API Manzanillo y considera la comunicación de laguna de San Pedrito con Las Garzas a través de un canal de 700 m de longitud con 57 m de ancho con 2 m de profundidad. La profundidad de la laguna de Las Garzas es uniforme con 2 m de profundidad. Con base a esta configuración de proyecto se analizó el funcionamiento hidráulico de los canales y de laguna de Las Garzas bajo escenarios de mareas vivas y mareas muertas. De las modelaciones se establece que las velocidades máximas se observan en los canales durante mareas vivas (Tabla 7.1). Con base a las modelaciones, puede observarse que los drenes ecológicos permiten que la zona de la franja ecológica se inunde con la marea, además de que el canal de comunicación



propuesto por la API Manzanillo permite que la onda de marea penetre hasta el final de la laguna de Las Garzas.

	Velocidades máximas (cm/s)					
	Canal de acceso	Muelle SEMAR	Dren inferior	Dren superior	Canal de comunicación	Zona de islas
Mareas Vivas	4.81	1.58	4.20	3.45	31.83	0.53
Mareas muertas	3.22	1.08	2.90	2.39	22.18	0.48

Tabla 7.1 Velocidades máximas derivadas de la modelación numérica

Para las simulaciones de salinidad se implementó un modelo tridimensional para establecer (1) el comportamiento inicial de la apertura de comunicación la laguna de San Pedrito (agua de mar) con la de Las Garzas (agua dulce), (2) la dispersión de la descarga de la PTAR bajo diferentes condiciones ambientales y (3) el tiempo de residencia, bajo condiciones de proyecto, de la laguna de Las Garzas.

Entre los resultados más relevantes de la modelación bajo la condición de proyecto se encuentran los siguientes:

- 1) Después de la apertura de la laguna de Las Garzas con la de San Pedrito esta se estabiliza después de 5-6 ciclos de marea (148 h).
- 2) El volumen de Las Garzas es de $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3$, el prisma promedio es de $0.306 \times 10^6 \text{ m}^3$, por lo tanto, el tiempo de residencia es de 105 h aproximadamente o equivalente a que en 4-5 ciclos de marea se renueva el agua de la laguna.
- 3) El volumen de la descarga de la PTAR es de $0.027 \times 10^6 \text{ m}^3$ y corresponde a un 9% del prisma de marea.
- 4) Es evidente que con la apertura de la laguna de Las Garzas la calidad del agua de la laguna mejorara significativamente.



- 5) Finalmente los canales ecológicos permite que se inunde la zona de manglar y por lo tanto se espera que, con el mantenimiento de los canales, el funcionamiento sea suficiente para mantener esta área, excepto la última parte sur de la franja hasta el inicio del primer de comunicación con la laguna de San Pedrito que tiene una zona de estancamiento.



8. Referencias

General bathymetric chart of the oceans, GEBCO. (2009).

http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/

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.

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.

Secretaría de Marina (1997). *Carta náutica numero 21342A.*

Secretaría de Marina (2005). *Tablas numéricas de predicción de mareas 2005, Océano pacífico.* Dirección general adjunta de oceanografía hidrografía y meteorología.

Tablas de predicción de Mareas. Instituto de Geofísica. UNAM

Westerink, J.J., Blain, C. A., Luetlich, 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.