

**MODELACIÓN HIDRODINAMICA Y DE LA CALIDAD DEL AGUA EN
ZONAS COSTERAS, CASO DE ESTUDIO DE LA BAHÍA DE SANTA
MARTA, COLOMBIA**



Diego Fernando Peñaloza Ruiz

Henry Jr. Cabarcas Casado

**Proyecto de investigación presentado como requisito parcial para optar al
título de: INGENIERO AMBIENTAL Y SANITARIO**

Director

Francisco García Rentería

Ingeniero Sanitario M. Sc.

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

SANTA MARTA D.T.C.H

2010

**MODELACIÓN HIDRODINAMICA Y DE LA CALIDAD DEL AGUA EN
ZONAS COSTERAS, CASO DE ESTUDIO DE LA BAHÍA DE SANTA
MARTA, COLOMBIA**

Diego Fernando Peñaloza Ruiz

Henry Jr. Cabarcas Casado

UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

SANTA MARTA D.T.C.H

2010

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma del presidente

Firma del jurado

Firma del jurado

Santa Marta,

Fecha:

RESUMEN

En el presente documento se muestran los resultados de un estudio de modelación de calidad de agua desarrollado en la Bahía de Santa Marta (BSM) en el cual fueron implementados varios modelos, primeramente se calibró y validó un modelo hidrodinámico tres dimensional para determinar las principales variables de flujo oceánico, tales como marea y corrientes predominantes; posteriormente se aplicó un modelo de calidad de aguas para salinidad y temperatura, un modelo de lanzamiento de partículas que utiliza el enfoque Lagrangeano para el transporte de contaminantes fue también implementado para la variable de coliformes totales, con el fin de establecer la dispersión de la pluma de contaminación del emisario submarino instalado actualmente en la Bahía. Por último fue usado un modelo de estratificación vertical para determinar el posible afloramiento de la pluma del emisario en el campo cercano, es decir su nivel de dilución en la columna de agua. Se encontró que los modelos usados presentaron un nivel de confianza relativamente alto para representar las condiciones oceánicas de la BSM, dando como resultado la distancia a la cual se dispersa la pluma y las direcciones y velocidades determinadas a lo largo del año 2008.

IAS
00061
Ej.1

CONTENIDO

RESUMEN.....	4
1. INTRODUCCIÓN	11
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. OBJETIVO GENERAL.....	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. MARCO TEÓRICO	15
3.1. EMISARIOS SUBMARINOS	16
3.2. CIRCULACIÓN OCEÁNICA	18
3.3. ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR	19
3.4. DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS MODELOS EMPLEADOS; SISTEMA BASE HIDRODINÁMICA AMBIENTAL SISBAHIA®	20
3.4.1. <i>Modelo Hidrodinámico Tres dimensional 3D</i>	21
3.4.1.1. Metodología de Modelo de Transporte Euleriano con Discretización Adaptativa.....	23
3.4.1.2. Metodologías de Modelo de Transporte Lagrangeano.	23
3.4.2. <i>Modelo de Calidad de Agua</i>	23
3.4.2.1. Transporte Advectivo Difusivo	24
3.4.3. <i>Modelo Lagrangeano de Transporte Advectivo Difusivo</i>	27
3.4.4. <i>Modelo de estratificación vertical PLUM3</i>	29
4. METODOLOGÍA.....	30
4.1. ÁREA DE ESTUDIO	30
4.2. MODELO HIDRODINÁMICO	30
4.2.1. <i>Información de campo</i>	30
4.2.1.1. Información Meteorológica	32
4.2.2. <i>Modelo Computacional</i>	33
4.2.3. <i>Análisis de Sensibilidad a Parámetros Físicos y Numéricos del Modelo 36</i>	
4.2.3.1. Parámetros Físicos.....	36
4.2.3.2. Parámetros Numéricos	37
4.2.4. <i>Calibración del Modelo</i>	37
4.2.5. <i>Escenarios de simulación</i>	38
4.3. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA.....	38
4.3.1. <i>Información de campo</i>	38
4.3.2. <i>Escenarios de Simulación</i>	38
4.4. MODELO LAGRANGEANO DE TRANSPORTE DE PARTÍCULAS	39
4.5. MODELO DE ESTRATIFICACIÓN VERTICAL PLUM3	39



5. RESULTADOS	40
5.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y NUMÉRICOS DEL MODELO	41
5.1.1. <i>Sensibilidad del modelo al paso de tiempo</i>	41
5.1.2. <i>Sensibilidad del modelo a la presencia y ausencia de vientos variables en el tiempo</i>	44
5.1.3. <i>Sensibilidad del modelo a la rugosidad de fondo, según el coeficiente n de Manning</i>	45
5.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN	46
5.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS METEOROLÓGICOS.....	47
5.4. SIMULACIONES HIDRODINÁMICAS	54
5.5. MODELO DE CALIDAD DE AGUA	62
5.6. MODELO DE LAGRANGEANO DE TRANSPORTE DE PARTÍCULAS.....	77
6. CONCLUSIONES	85
7. BIBLIOGRAFÍA	86

Lista de Tablas

TABLA 1. FECHAS PARA EXTRACCIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS.....	33
TABLA 2. PERIODOS DE SIMULACIÓN	40
TABLA 3. CONSTITUYENTES DE MAREA RESULTANTES DEL ANÁLISIS DE ARMÓNICOS.	
.....	41
TABLA 4. NUMERO DE COURANT PARA DIFERENTES PASOS DE TIEMPO	42

Lista de Figuras

FIGURA 1. INSTALACIÓN DEL EQUIPO WLR7	31
FIGURA 2. ESTACIÓN DE MEDICIÓN DE DATOS OCEANOGRÁFICOS MEDIANTE LOS EQUIPOS WLR7 Y RCM9.....	32
FIGURA 3. BSM Y DOMINIO DE SIMULACIÓN.	34
FIGURA 4. ESTACIÓN DE EXTRACCIÓN DE DATOS DE LA SIMULACIÓN.	42
FIGURA 5. SENSIBILIDAD DE LA ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR A LA VARIACIÓN DEL PASO DE TIEMPO DEL MODELO HIDRODINÁMICO 3D.....	43
FIGURA 6. SENSIBILIDAD DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE A LA VARIACIÓN DEL PASO DE TIEMPO DEL MODELO HIDRODINÁMICO 3D.....	44
FIGURA 7. SENSIBILIDAD DE LA ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR A LA PRESENCIA/AUSENCIA DE VIENTOS.	44
FIGURA 8. SENSIBILIDAD DE LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE A LA PRESENCIA Y AUSENCIA DE VIENTOS.....	45
FIGURA 9. SENSIBILIDAD DEL MODELO A LA VARIACIÓN DEL COEFICIENTE N DE MANNING, CON RESPECTO A LA VELOCIDAD DE LA CORRIENTE.	46
FIGURA 10. CALIBRACIÓN DEL MODELO EN PERIODO DE MAREA BAJA SIMULACIÓN "A".	47
FIGURA 11. CALIBRACIÓN DEL MODELO EN PERIODO DE MAREA ALTA, SIMULACIÓN "B".....	47
FIGURA 12. ROSAS DE VIENTOS PARA LAS SIMULACIONES 1 (A), 2 (B), 3 (C), 4 (D), 5 (E) Y 6 (F).	50
FIGURA 13. ROSAS DE VIENTOS PARA LAS SIMULACIONES 7 (A), 8 (B), 9 (C), 10 (D), 11 (E) Y 12 (F).....	51
FIGURA 14. ROSAS DE VIENTOS PARA LAS SIMULACIONES 13 (A), 14 (B), 15 (C), 16 (D), 17 (E) Y 18 (F).	52
FIGURA 15. ROSAS DE VIENTOS PARA LAS SIMULACIONES 19 (A), 20 (B), 21 (C), 22 (D), 23 (E) Y 24 (F).	53
FIGURA 20. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 1.	56
FIGURA 21. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 2.	56
FIGURA 22. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 3.	56
FIGURA 23. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 4.	57
FIGURA 24. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 5.	57
FIGURA 25. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 6.	57
FIGURA 26. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 7.	57
FIGURA 27. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 8.	58
FIGURA 28. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 9.	58
FIGURA 29. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 10.	58
FIGURA 30. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 11.	58
FIGURA 31. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 12.	59

FIGURA 32. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 13.	59
FIGURA 33. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 14.	59
FIGURA 34. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 15.	59
FIGURA 35. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 16.	60
FIGURA 36. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 17.	60
FIGURA 37. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 18.	60
FIGURA 38. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 19.	60
FIGURA 39. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 20.	61
FIGURA 40. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 21.	61
FIGURA 41. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 22.	61
FIGURA 42. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 23.	61
FIGURA 43. RESULTADOS DEL MODELO HIDRODINÁMICO PARA LA CORRIDA 24.	62
FIGURA 44. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 1.	64
FIGURA 45. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 2.	64
FIGURA 46. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 3.	65
FIGURA 47. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 4.	65
FIGURA 48. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 5.	66
FIGURA 49. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 6.	66
FIGURA 50. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 7.	67
FIGURA 51. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 8.	67
FIGURA 52. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 9.	68
FIGURA 53. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 10.	68
FIGURA 54. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 11.	69
FIGURA 55. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 12.	69
FIGURA 56. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 13.	70
FIGURA 57. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA 14.	70

FIGURA 58. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA	
15.	71
FIGURA 59. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA	
16.	71
FIGURA 60. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA	
17.	72
FIGURA 61. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA	
18.	72
FIGURA 62. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA	
19.	73
FIGURA 63. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA	
20.	73
FIGURA 64. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA	
21.	74
FIGURA 65. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA	
22.	74
FIGURA 66. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA	
23.	75
FIGURA 67. PERFILES DE TEMPERATURA, SALINIDAD Y DENSIDAD PARA LA CORRIDA	
24.	75
FIGURA 68. GRÁFICAS TS PARA TODAS LAS SIMULACIONES HIDRODINÁMICAS Y DE CALIDAD DEL AGUA.	76
FIGURA 69. GRAFICO DE EXCEDENCIA PARA 1000 NMP/100ML GENERAL PARA TODAS LAS SIMULACIONES.	77
FIGURA 70. GRÁFICOS DE EXCEDENCIA, SIMULACIONES 1 (A), 2 (B), 3 (C) Y 4 (D). .	79
FIGURA 71. GRÁFICOS DE EXCEDENCIA, SIMULACIONES 5 (A), 6 (B), 7 (C) Y 8 (D). .	80
FIGURA 72. GRÁFICOS DE EXCEDENCIA, SIMULACIONES 9 (A), 10 (B), 11 (C) Y 12 (D).	81
FIGURA 73. GRÁFICOS DE EXCEDENCIA, SIMULACIONES 13 (A), 14 (B), 15 (C) Y 16 (D).	82
FIGURA 74. GRÁFICOS DE EXCEDENCIA, SIMULACIONES 17 (A), 18 (B), 19 (C) Y 20 (D).	83
FIGURA 71. GRÁFICOS DE EXCEDENCIA, SIMULACIONES 21 (A), 22 (B), 23 (C) Y 24 (D).	84

1. INTRODUCCIÓN

Las costas colombianas son las áreas del país que presentan mayores impactos sobre la calidad ambiental. Este hecho se atribuye comúnmente a que en estas zonas convergen aspectos como la presión sobre el medio por el acelerado crecimiento poblacional, la actividad turística, las actividades industriales y comerciales, entre otros. La Bahía de Santa Marta (BSM) presenta un alto grado de intervención antrópica cuyos efectos se han evidenciado desde hace décadas en su calidad ambiental marina.

Entre las principales afectaciones ambientales sobre la BSM se pueden enumerar las descargas pluviales de la ciudad que arrastran hasta el océano grandes cantidades de sólidos como en el caso del colector pluvial de Bastidas paralelo a la vía alterna al puerto, la desembocadura de los ríos Manzanares y Gaira que aportan concentraciones importantes de sustancias orgánicas, el vertimiento de aguas residuales mediante el sistema de emisario submarino, las descargas de aguas de lastre de los buques cargueros, entre otras.

Las condiciones ambientales de la BSM dependen en gran medida de las condiciones de circulación oceánica como el régimen de las mareas, corrientes, el oleaje y el efecto de los vientos. Está demostrado que las costas colombianas correspondientes a las ciudades de Barranquilla, Cartagena y Santa Marta son las costas más impactadas en todo el país en cuanto a la calidad microbiológica del agua, y otros aspectos de calidad ambiental marina, hecho que obedece principalmente a factores como las descargas pluviales y sanitarias y su relación con la circulación oceánica a través de factores como las mareas y las corrientes marinas.

En la ciudad de Santa Marta no han sido realizados estudios oceanográficos que permitan medir directamente sobre la Bahía las condiciones de marea y corrientes marinas, esto se debe principalmente a los costos elevados de



compra y operación de los equipos mareográficos adecuados para este tipo de mediciones; debido a esta situación aún se desconocen las condiciones reales de circulación oceánica, específicas que rigen la BSM y no se tiene un seguimiento en tiempo real de las mismas.

Tampoco han sido realizados estudios hidrodinámicos tres dimensionales en la BSM, como el que se realizó en la presente investigación; sin embargo han sido realizados estudios de modelación de calidad del agua, los cuales han empleado métodos alternativos para la obtención de datos por altimetría satelital y por modelos preliminares para la calibración de los modelos hidrodinámicos, estudios como estos se pueden observar en los trabajos de Osorio y Pardo (2007) quienes modelaron la dilución inicial del vertimiento del emisario submarino de la ciudad de Santa Marta, Iguarán y Granados (2007) abordando el tema de dispersión de manchas de crudo sobre la BSM y el estudio de la pluma de contaminación del río Manzanares realizado por Altamar y Coley (2007).

La modelación de calidad del agua es un tema extenso dentro de la investigación de recursos hídricos costeros, por lo cual se convierte en un tema poco estudiado en el ambiente investigativo local, muchas veces debido a la complejidad en la abstracción de modelos y la aplicación de los mismos a casos de estudio, y sumado a esto la complejidad de la problemática de los cuerpos de agua como la Bahía de Santa Marta.

Los modelos de calidad de agua que pretenden simular la dispersión de contaminantes en cuerpos costeros dependen de modelos hidrodinámicos, los cuales a su vez abarcan una compleja gama de aspectos oceanográficos como la estratificación de salinidad, temperatura y densidad, los fenómenos de circulación como la marea astronómica y la marea meteorológica, la influencia de los vientos y las corrientes marinas sobre el flujo hidrodinámico, entre otros; cada uno de estos aspectos implica un estudio detallado con costos relativamente altos.

La situación descrita anteriormente se refleja en una ausencia de experiencias de aplicación de modelos de calidad de agua marina en el Caribe colombiano, por lo cual se quiere contribuir a ampliar el conocimiento en estos aspectos planteando la siguiente pregunta de investigación principal: ¿Cómo influye el comportamiento hidrodinámico de la BSM en la dispersión de la pluma de contaminación del emisario submarino? De donde se desprenden las siguientes preguntas de investigación secundarias: ¿Cuáles son los parámetros principales de circulación oceánica que rigen el comportamiento hidrodinámico de la BSM?, ¿Cuál es el comportamiento de la pluma de contaminación del emisario submarino de la ciudad de Santa Marta?, y por último ¿existe o no estratificación en la pluma del emisario submarino?

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar la influencia de la hidrodinámica de la BSM sobre la dispersión de la Pluma de contaminación del emisario submarino a través de la calibración de un modelo hidrodinámico tres dimensional y la aplicación de modelos de calidad de agua de campo cercano y de campo lejano mediante la implementación de un enfoque Lagrangeano.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calibrar un modelo hidrodinámico 3D que represente las condiciones de circulación oceánica de mareas, corrientes, salinidad y temperatura de la BSM.
- Determinar la distribución espacial y temporal de la pluma de contaminación del emisario submarino a través de la calibración de un modelo de transporte Lagrangeano acoplado al modelo hidrodinámico tres dimensional.
- Determinar la presencia o ausencia de estratificación de densidades en la columna de agua y su influencia en la dispersión de la pluma de contaminación del emisario submarino.

3. MARCO TEÓRICO

Los modelos numéricos que describen los campos de circulación, variación del nivel de agua en los océanos, bahías y ríos están basados en un sistema de leyes hidrodinámicas que comprenden las ecuaciones de la conservación de la cantidad de movimiento, la conservación de masa (continuidad) y la conservación de la energía. La modelación numérica ha sido ampliamente usada para conocer el comportamiento de los sistemas naturales y predecir posteriormente su respuesta a los cambios de parámetros de entrada, pero los modelos deben ser calibrados y verificados antes de ser puestos en funcionamiento.

La combinación de complejidad en los parámetros numéricos y físicos, así como la misma estructura del modelo hidrodinámico y los errores en las mediciones de campo, son factores que introducen incertidumbre en la utilización de modelos numéricos (Sincock, Wheeler y Whitehead, 2003). Igualmente la calidad de la información usada en las condiciones de fronteras, funciones forzantes, estructura de las mallas empleadas y el dominio computacional en sí mismo, tienen un peso significativo en el comportamiento del modelo y su habilidad para representar el mundo real con cierto margen de incertidumbre. Cuanta más certeza se tiene de los parámetros físicos y numéricos del modelo, menor será el grado de incertidumbre (Iguarán y Granados, 2007).

La modelación hidrodinámica depende de varios factores, entre ellos los más importantes son las condiciones en los contornos abiertos del dominio, es decir las condiciones iniciales y las condiciones de frontera (Bennett, 1982), las primeras definen el estado del fluido en el tiempo cero y suministran los valores de las variables dependientes antes de empezar los cálculos, mientras que las condiciones de frontera suministran información sobre las condiciones específicas del sistema modelado en el contorno abierto de su dominio. Tradicionalmente, las condiciones de las fronteras abiertas en

modelos hidrodinámicos, pueden ser obtenidas de dos formas; por mediciones directas de equipos mareográficos en las cercanías de dichas fronteras (Zaron *et al.*, 2007) o generadas desde modelos numéricos de larga escala, tales como el modelo global de marea de Schwiderski (Schwiderski, 1980), o las versiones de los modelos globales derivados de la misión Topex/Poseidón, entre ellos TPX0.3 y TPX6.2 (Iguarán y Granados, 2007).

Actualmente existen varios modelos hidrodinámicos a nivel mundial, los cuales han sido desarrollados para condiciones específicas de cada área de estudio, entre los más recientemente estudiados se pueden mencionar *Gulfhydro* (Al-Rabeh *et al.*, 1998), SPH con el cual se modeló el sector costero de Galicia (España) para condiciones de tormentas (Crespo *et al.*, 2007), el RMA10 usado para modelar la salinidad y las corrientes residuales bajo los efectos forzantes de los vientos y las mareas (Fossati *et al.*, 2007), RMA2 para obtener niveles de superficie libre y componentes horizontales de velocidad en campos bidimensionales (Corral *et al.*, 2005), el modelo Mohid el cual fue usado para modelar las mareas en el Canal de Espinheiro en Portugal (Vaz *et al.*, 2007), el modelo AQUALAB el cual fue usado para determinar la influencia del emisario submarino en la BSM en Colombia (Rodríguez *et al.*, 2007), el POM utilizado para modelar bahías, regiones costeras y áreas de influencia oceánica en bahías de Perú (Rodríguez *et al.*, 2007; Saavedra *et al.*, 2003), entre otros.

3.1. EMISARIOS SUBMARINOS

Los emisarios submarinos son tuberías instaladas sobre el lecho marino las cuales transportan aguas residuales domésticas hasta una profundidad y distancia de la costa tal, que la carga orgánica y contaminante resultante de su vertimiento no debe provocar daños sanitarios y/o ecológicos a los ecosistemas marinos y terrestres, ni a las poblaciones costeras circundantes, ni a las playas de recreación pública, ni a la industria pesquera (RAS 2000).

En el momento de la descarga la mezcla causada por el impulso de las aguas servidas al salir del emisario submarino a través de un puerto o multidifusor generan un chorro turbulento en el medio ambiente marino. Estos turbulentos chorros de flotación se unen dentro de la pluma donde el efluente eleva su flotación en la columna de agua.

A medida que aumenta la pluma, en el agua de mar los procesos de dispersión causan ambientes turbulentos que son arrastrados dentro de la pluma, resultando en una rápida dilución del efluente, la pluma seguirá aumentando en la columna de agua hasta el punto de flotación neutra, que está determinado por la distribución vertical de la densidad local es decir, se presentará un efecto de campo lejano.

Si la columna de agua esta estratificada, la pluma quedará atrapada en el nivel de flotabilidad neutra y la pluma del emisario entonces comenzará a extenderse lateralmente. Una vez que la pluma empieza a extenderse lateralmente, la mezcla turbulenta disminuye rápidamente y al final se llega a la región de la mezcla inicial, momento en que la transición del campo cercano a campo lejano de control de la pluma se produce.

El campo cercano es la región del cuerpo receptor, en donde las características iniciales de flujo, la flotación y la geometría del emisario influyen en la trayectoria y el grado de mezcla de la descarga efluente. El comportamiento de la pluma del emisario en el campo cercano puede afectar significativamente el destino final del efluente de aguas negras en el campo lejano. El campo lejano es la región donde se efectúan los mecanismos físicos de mezcla dominados por la dirección, velocidad de la corriente y dispersión horizontal que condicionan la dilución, que es mucho menor que la inicial (Osorio *et al.*, 2007; Gutiérrez, 2005).

Los procesos de circulación de campo lejano, consisten en variables espaciales y temporales de las corrientes y columnas de aguas estratificadas, por tanto tienen un mayor impacto en el aumento de la altura y

la densidad de la pluma, que desempeñan un papel significativo en la pluma de transporte posterior a lugares distantes. Una caracterización precisa de la mezcla inicial es por tanto una confiable predicción del destino y el impacto ambiental de una descarga importante del emisario, por lo tanto, en estas áreas es requerido un modelo de campo lejano para predecir realmente el transporte y destino del efluente residual.

El comportamiento de la pluma en el campo cercano de un emisario ha sido estudiado intensamente a través del uso de varios modelos, tales como CORMIX (Jirka y Akar 1991), RSB (Roberts *et al.* 1989), UPLUME, UOUTPLM, UDKHDEN, UMERGE y ULINE (Muellenhoff *et al.* 1985). Mientras que para el campo lejano algunos de los modelos utilizados son el DELFT, RMA, WQMAP, EFDP y el ECOM (Rodríguez *et al.*, 2007)

Aunque existen modelos que estudian por separados estos dos fenómenos que ocurren después de una descarga de aguas residuales al medio marino no deben ser modelados de tal forma, razón por la cual surgieron estudios que acoplaron ambos procesos, desarrollando modelos capaces de resolver la ecuación de transporte tanto en el campo lejano como en el cercano. Generando así modelos acoplados como el CORMIX y el RSB (Rodríguez *et al.*, 2007). El modelo de transporte Lagrangeano que trabajo acoplado dinámicamente al campo de corrientes del modelo hidrodinámico 3D del SisBaHia[®] también puede ser usado para modelar el comportamiento de la pluma en el campo cercano y lejano para fuentes puntuales y emisarios.

3.2. CIRCULACIÓN OCEÁNICA

La circulación de las corrientes marinas en el área depende del sistema de vientos. En el periodo seco, el Alisio del NE crea una corriente EO paralela a la costa, que durante el periodo lluvioso se contrarresta por otra corriente OE, originada en el Caribe sur occidental (INVEMAR, 1990 citado por Altamar y Coley., 2007;). Las mareas en la ciudad de Santa Marta son muy

irregulares y muestran una combinación de tipo diurno y semidiurno, con un rango mareal de 30 cm máximo (Altamar y Coley., 2007).

Por lo general el oleaje se dirige al suroeste con una intensidad que varía dependiendo de la dirección y el perfil de la costa. En la zona central de la bahía se observan fenómenos de refracción más fuerte porque el ángulo incidente del oleaje es grande; en la área sur de la bahía donde los perfiles de la playa son muy pronunciados se desarrollan fenómenos de reflexión mientras que en la parte norte en los alrededores de punta Betín se da un fenómeno de difracción (Memorias, 1993 citado por Altamar y Coley, 2007).

3.3. ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR

El fenómeno oceánico conocido como marea, no es más que la variación de la elevación de la superficie del océano con respecto al tiempo para un área determinada; influenciada por variables diversas como la rotación de la tierra, las posiciones de la luna y el sol, las forzantes meteorológicas, entre otras. Modelos matemáticos del comportamiento de la marea han establecido ciertos parámetros que definen el comportamiento de dicho fenómeno para un área y un periodo de tiempo determinado; dichos parámetros son llamados armónicos de marea o constituyentes de mareas, los cuales pueden ser de carácter diurno, semidiurno, quincenal, mensual, de largo periodo, entre otros. Para el presente estudio se usaron los armónicos resultantes del análisis espectral de mareas de dos meses de mediciones continuas, realizadas directamente sobre un punto de la BSM, lo cual será descrito con detalle más adelante.

Desde principios de 1990 se empezó a considerar la importancia de la influencia de las mareas internas en los fenómenos oceánicos. Se pensaba que las mareas internas no tenían efecto en la marea externa o en la superficie del agua, pero esto cambió cuando se empezó a investigar el problema de la transferencia de energía en el océano (Peraud *et al.*, 2008) lo cual contribuyó a comprobar que las mareas internas son afectadas en gran

medida por los gradientes batimétricos. Lo cual indica que en aguas de poca profundidad, la batimetría es un factor forzante para las mareas internas (Abdennadher *et al.*, 2006).

Los constituyentes de mareas fundamentales se dividen en diurnos, semidiurnos y de largo periodo; los diurnos son principalmente O1, Q1, P1 y K1, mientras que los semidiurnos son N2, M2, S2 y K2 y los de largo periodo son Mf y Mm (Zahran *et al.*, 2006).

Existen evidencias de que las variaciones en el nivel medio del mar son afectadas por factores que no son considerados en la mayoría de los modelos hidrodinámicos, por ejemplo las variaciones estacionales o las variaciones de las mareas a largo plazo (Bâki *et al.*, 2007). Sin embargo han sido realizadas modelaciones con el fin de considerar dichos factores, lo cual trajo consigo el beneficio de poder considerar en el modelo el efecto de los forzantes de variación estacional e interanual además de las mareas barotrópicas y el efecto de los vientos (Saint-Cast, 2008).

3.4. DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS MODELOS EMPLEADOS; SISTEMA BASE HIDRODINÁMICA AMBIENTAL SISBAHIA®

El SisBaHia® es un sistema de la modelación ambiental de cuerpos de aguas que fue desarrollado en la Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brasil. Este sistema posee una gran variedad de modelos, entre los cuales se encuentran principalmente los modelos hidrodinámicos 2HD y 3D, modelos de calidad de agua para salinidad, temperatura, nitratos, OD DBO, Nitrógeno y Fosforo, modelos de transporte Euleriano y Lagrangeano, modelos de generación y de transporte de ondas, y modelos de transporte de sedimentos. A continuación son descritos los modelos usados en el presente estudio, a saber: el modelo hidrodinámico tres dimensional, modelo de calidad de agua para salinidad y temperatura y modelo de transporte Lagrangeano para el lanzamiento de partículas y la modelación de coliformes.



3.4.1. Modelo Hidrodinámico Tres dimensional 3D

Para la modelación de la circulación hidrodinámica de la BSM, se utilizó el módulo de circulación hidrodinámica tres dimensional, dicho módulo hace parte del Sistema Base de Hidrodinámica Ambiental SisBAHIA[®], desarrollado por el departamento de ingeniería oceanográfica y costera, del programa de ingeniería oceánica de la universidad federal de río de Janeiro. (Rosman, 2009).

Las cuatro ecuaciones necesarias para calcular las cuatro incógnitas de la circulación hidrodinámica (u, v, w, ζ), en el módulo 3D de SisBAHIA[®] son resumidas a continuación:

Ecuación de cantidad de movimiento con aproximación hidrostática en dirección x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \approx -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) + 2\phi \sin \theta v \quad \text{Ecuación 1}$$

Ecuación de cantidad de movimiento con aproximación hidrostática en dirección y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \approx -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) - 2\phi \sin \theta u \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde $\frac{\partial u}{\partial t}$ representa la aceleración de flujo local, en flujos permanentes este término es igual a cero, $u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$ representa la aceleración advectiva del flujo en un instante dado, $-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$ significa la variación hidrostática de la presión en la dirección x, $\frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)$ hace referencia a la resultante de las tensiones turbulentas en el flujo y $2\phi \sin \theta v$ representa la aceleración inducida por el efecto de Coriolis.

En la ecuación de cantidad de movimiento con aproximación hidrostática en dirección y los términos son similares a los descritos en el párrafo anterior, sino que están definidos en la dirección y.

Ecuación de continuidad de volumen:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \approx 0 \quad \text{Ecuación 3}$$

De donde se sabe que el fluido se comporta de manera incompresible, es decir cambia su forma pero no su volumen a medida que se mueve.

Ecuación de la continuidad (del volumen) integrada a lo largo de la línea vertical:

$$\frac{\partial(\zeta+h)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \int_h^\zeta u dz - \frac{\partial}{\partial y} \int_h^\zeta v dz + q_P - q_E \pm q_I \quad \text{Ecuación 4}$$

Esta ecuación posee el mismo significado que la anterior, pero de esta forma se puede observar que la altura de la columna de agua ($\zeta + h$) varía en el tiempo como resultado de dos flujos efectivos a través de la columna de agua en las direcciones x e y , a saber $-\frac{\partial}{\partial x} \int_h^\zeta u dz$ y $-\frac{\partial}{\partial y} \int_h^\zeta v dz$ respectivamente; y también del balance de los flujos de precipitación q_P , evaporación q_E e infiltración q_I por unidad de área.

En la modelación del transporte de contaminantes como manchas de petróleo y plumas de emisarios, es usual un conflicto entre las escalas espaciales, las manchas o plumas y las escalas de discretización usadas en el modelo hidrodinámico.

Frecuentemente las plumas contaminantes tienen dimensiones horizontales de centenas de metros a pocos kilómetros. Por tanto, es evidente que si la intención del modelador es utilizar la discretización del modelo hidrodinámico para modelar el transporte de plumas contaminantes, habrá la necesidad de una malla muy fina.

Centrándose en el caso de manchas y plumas contaminantes pequeñas en relación al dominio modelado, dos metodologías distintas se han usado para resolver tal conflicto de escalas:

3.4.1.1. Metodología de Modelo de Transporte Euleriano con Discretización Adaptativa.

En este caso, la pluma es representada por una distribución de concentraciones, habiendo necesidad de generar una sub-malla suficientemente refinada que rodean la misma con el fin de permitir el cálculo de las concentraciones con la exactitud debida. El empleo de tal metodología es más común en elementos finitos, siendo en general muy ineficiente cuando es aplicada a diferencias finitas.

3.4.1.2. Metodologías de Modelo de Transporte Lagrangeano.

En este caso la pluma es representada por una nube con muchas partículas, y el problema principal pasa a ser el de calcular la posición en espacio continuo de cada partícula. Como el espacio de posición de las partículas es continuo, el conflicto de escalas desaparece, porque la discretización del modelo hidrodinámico sólo se utilizará para interpolaciones de campo de velocidades, lo que es perfectamente adecuado. Por otra parte, los modelos Lagrangeanos son absolutamente seguros, que no presentan problemas de conservación de masa que a veces ocurren en los modelos Eulerianos.

3.4.2. Modelo de Calidad de Agua

El modelo de Calidad del Agua y eutrofización (MQA) se desarrolla con base en el Modelo Euleriano advectivo - difusivo (MTAD) integrado en vertical, para escalar pasivos y no conservativos. Escalares no conservativos, que representan la mayoría de sustancias existentes en el agua, que sufren modificación de concentración a través de procesos físicos, biológicos y químicos.

Los modelos de transporte Euleriano resuelven una ecuación de transporte sobre una malla fija. Una integración en dirección vertical sugiere que este modelo deba ser aplicado en cuerpos de aguas poco profundos, que poseen dimensiones horizontales preponderantes sobre una dimensión vertical, con una columna de agua bien mezclada, donde una estratificación vertical es de poca relevancia, este tipo de cuerpo receptor, el campo de velocidades usado es promediado en vertical, sin permitir una descripción del perfil de velocidades. Para el caso en estudio, la estratificación es objeto de estudio a través de otro modelo computacional de campo cercano.

3.4.2.1. Transporte Advectivo Difusivo

Una ecuación integrada en una capa de espesura H , que generalmente va del fondo a la superficie, describiendo el transporte de un escalar para variables de gran escala (Bedford, 1994 citado por Rosman, 2009), usando una técnica de filtración para la modelación de tensiones turbulentas, es dada por:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x_i} \left(H \left[D_{ij} \delta_{jk} + \frac{\Lambda_k^2}{12} \left| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x_k} \right) - \frac{C}{H} \frac{(q_P - q_E \pm q_I)}{\Sigma_q} + \Sigma R$$

Donde C es la concentración de un escalar de interés, U_i son las componentes de velocidad en dirección x_i promediadas en dirección vertical, q_P , q_E y q_I son valores dados de caudal por unidad de área, por ejemplo $[m^3/s/m^2]$, respectivamente, de precipitación, evaporación y filtración ΣR representa reacciones cinéticas producción a consumo, H es la altura de la columna de agua, D_{ij} es el tensor que representa un coeficiente de difusión turbulenta de masa, δ_{jk} representa el delta de Kronecker y $\Lambda_k = \alpha_k \Delta x_k$ es el ancho del filtro de tamaño x_k , siendo α_k un parámetro de escala. Los valores típicos de α_k calibrados para difusión/advección son del orden de 0.25 a 2.0, con valor siempre igual a 1.0. En la ecuación $i, j = 1, 2$ y $k = 1, 2, 3$, siendo $k = 3$ correspondiente al tiempo t .

El coeficiente D_{ij} representa la mezcla debido a la turbulencia generada principalmente por el fondo, puede ser descompuesta según la dirección longitudinal y transversal:

$$\begin{aligned} D_{xx} &= D_L \cos^2 \varphi + D_T \sin^2 \varphi \\ D_{xy} &= D_{yx} = D_L D_T \sin \varphi \cos \varphi \quad \text{Ecuación 5} \\ D_{yy} &= D_L \sin^2 \varphi + D_T \cos^2 \varphi \end{aligned}$$

Donde D_L y D_T son, respectivamente, los coeficientes en dirección longitudinal y transversal y φ es el ángulo entre la línea de corriente y el eje x . El coeficiente de mezcla turbulenta transversal es 40 veces menor que la longitud debido, principalmente, al hecho de que los gradientes de mezcla transversales son mucho menores que los gradientes longitudinales. Fisher (1979) parametrizó estos coeficientes de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} D_L &= \alpha 5.93 u_* H \quad \text{Ecuación 6} \\ D_T &= \beta 0.15 u_* H \end{aligned}$$

Donde α y β son parámetros incluidos para facilitar la calibración y u_* es la velocidad de fricción característica. El modelo permite dos tipos de entrada para el coeficiente de difusión turbulenta: constante en espacio y en tiempo o variables. Si el coeficiente es constante, los valores de D_{xx} , D_{xy} y D_{yy} deben ser especificados. Si es variable, el modelo calcula el coeficiente, a partir de la ecuación ($D_L = \alpha 5.93 u_* H$ Ecuación 6) debiendo ser proporcionada solo la escala longitudinal y transversal, es decir, los parámetros α y β (Fisher, 1979 citado por Rosman 2009).

Volteando la ecuación 1 y expandiendo las derivadas (Rosman, 2000), obtenemos:

$$\begin{aligned} (1 - u_{xt} - v_{yt}) \frac{\partial C}{\partial t} + (U - u_{xx} - v_{yy}) \frac{\partial C}{\partial x} + (V - u_{xy} - v_{yy}) \frac{\partial C}{\partial y} &= \frac{T_{xx}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial x^2} + \frac{T_{xy}}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ \frac{T_{xt}}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) + \frac{T_{yx}}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{T_{yy}}{H} \frac{\partial C^2}{\partial y^2} + \frac{T_{yt}}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) - \frac{C}{H} \Sigma q + \Sigma R \quad \text{Ecuación 7} \end{aligned}$$

Donde U y V son las componentes de velocidad en dirección x y y , respectivamente, y:

$$T_{xx} = H \left[D_{xx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right]$$

$$T_{xy} = H \left[D_{xy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \right]$$

$$T_{xt} = H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right|$$

$$T_{yx} = H \left[D_{yx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right]$$

$$T_{yy} = \left(H \left[D_{yy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right| \right] \right)$$

$$T_{yt} = H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right|$$

$$u_{xx} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \left[D_{xx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial x} \right| \right] \right)$$

$$u_{xy} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \left[D_{xy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial y} \right| \right] \right)$$

$$u_{xt} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial U}{\partial t} \right| \right)$$

$$u_{yx} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(H \left[D_{yx} + \frac{\Lambda_x^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right] \right)$$

$$u_{yy} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(H \left[D_{yy} + \frac{\Lambda_y^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial y} \right| \right] \right)$$

$$u_{yt} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(H \frac{\Lambda_t^2}{12} \left| \frac{\partial V}{\partial t} \right| \right)$$

Las velocidades u_{xx} , u_{xy} , u_{xt} , u_{yx} , u_{yy} y u_{yt} , son llamadas de “velocidades difusivas”, representando la parte referente a mezclas difusas. Tenemos entonces la ecuación de transporte de un escalar dada por:

$$P_t \frac{\partial C}{\partial t} + P_x \frac{\partial C}{\partial x} + P_y \frac{\partial C}{\partial y} = P_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + P_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + P_{xy} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right) + P_{yx} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) + P_{xt} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) + P_{yt} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right) - \frac{C}{H} \underbrace{(q_P - q_E \pm q_I)}_{\Sigma q} + \Sigma R \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$$P_t = 1 - u_{xt} - v_{yt}, \quad P_x = U - u_{xx} - v_{yx}$$

$$P_y = V - u_{xy} - v_{yy}, \quad P_{xx} = \frac{T_{xx}}{H}, \quad P_{xy} = \frac{T_{xy}}{H}$$

$$P_{xt} = \frac{T_{xt}}{H}, \quad P_{yx} = \frac{T_{yx}}{H}, \quad P_{yy} = \frac{T_{yy}}{H} \quad \text{e} \quad P_{yt} = \frac{T_{yt}}{H}$$

3.4.3. Modelo Lagrangeano de Transporte Advectivo Difusivo

El modelo Lagrangeano de transporte advectivo difusivo tiene la ventaja de utilizar el campo de velocidades generado por el modelo hidrodinámico, sin estar limitado a eventuales limitaciones de escalas impuestas por el grado de discretización del mismo. Por tanto, puede ser eficiente aplicado a problemas con fuentes de pequeña escala en relación al dominio del modelo hidrodinámico, o con fuertes gradientes, como se presenta a menudo en muchos casos prácticos.

Con el modelo Lagrangeano, en general las fuentes contaminantes son representadas por un dado número de partículas lanzadas en la región de origen, en intervalos de tiempos regulares. Las partículas son dispuestas en la región de origen aleatoriamente y son advectadas por las corrientes calculadas a través del modelo hidrodinámico. La posición de cualquier partícula en instante siguiente, P^{n+1} , es determinada a través de la expansión en serie de Taylor a partir de la posición anterior conocida, P^n :



$$P^{n+1} = P^n + \Delta t \frac{dP^n}{dt} + \frac{\Delta t^2}{2!} \frac{d^2 P^n}{dt^2} + \text{T.A.D}$$

Donde T.A.D., son condiciones de alto orden despreciados. Las derivadas temporales de P son obtenidas a partir del campo de velocidades hidrodinámico resoluble, conforme se describe a continuación:

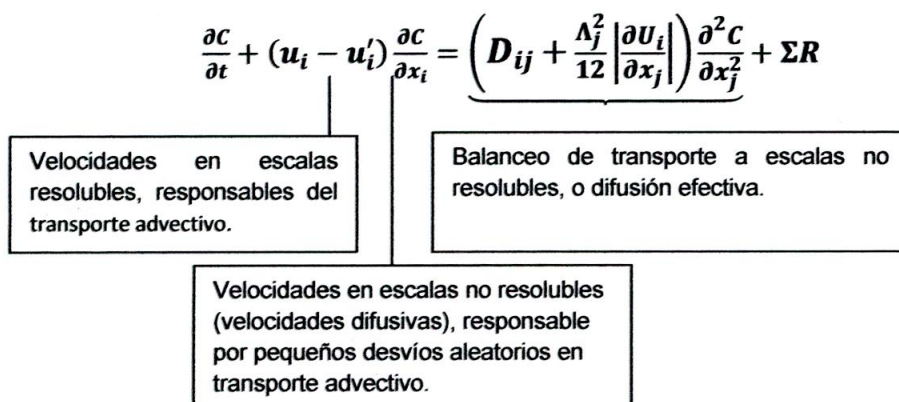
$$\frac{dP}{dt} = \vec{V}(u, v, w)$$

$$\frac{d^2 P}{dt^2} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + u \frac{\partial \vec{V}}{\partial x} + v \frac{\partial \vec{V}}{\partial y} + w \frac{\partial \vec{V}}{\partial z}$$

Donde se supone que las escalas resolubles, las velocidades que promueven el transporte advectivo de las partículas, $\vec{V}(u, v, w)$, y las velocidades hidrodinámicas obtenidas del modelo hidrodinámico 3D son las mismas. La inclusión de dos condiciones de aceleración en determinada posición es opcional, pero permite el uso de intervalos de tiempo significativamente mayores, con buena precisión. Después la determinación de la nueva posición de cada partícula, un desvío aleatorio, causado por los movimientos en escalas no resolubles que generan “velocidades difusivas”, puede ser incluido. La magnitud del desvío aleatorio depende de las derivadas espaciales y las difusividades turbulentas. Para entender este proceso, considere la ecuación de transporte Euleriano:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left[D_{ij} + \frac{\Lambda_j^2}{12} \left| \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right| \right] \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + \Sigma R \therefore$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} + \frac{\Lambda_j^2}{12} \left| \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right| \right)}_{u'_i} \frac{\partial C}{\partial x_j} + \left(D_{ij} + \frac{\Lambda_j^2}{12} \left| \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right| \right) \frac{\partial^2 C}{\partial x_j^2} + \Sigma R \therefore$$



Como se indica en el esquema anterior, las “velocidades difusivas” son de hecho función de la variación espacial de la difusividad turbulenta. Por tanto el proceso difusivo se divide en dos partes: una que añade incertidumbre a la advección y otra estrictamente difusiva.

3.4.4. Modelo de estratificación vertical PLUM3

Para determinar la estratificación de la columna de agua y su relación con el posible afloramiento de la pluma de contaminación del emisario, se empleó el modelo PLUM3, el cual resuelve a través del método de Runge-Kutta ecuaciones diferenciales de primer orden para determinar el alcance vertical, espesor y dilución de la pluma.

Este programa computacional facilita la modelación de la distribución de la pluma a través de la aplicación de conceptos de gradiente de densidad y temperatura, lo cual lo clasifica como un modelo de campo cercano; dentro de las cualidades más importantes del modelo se destaca su capacidad para arrojar resultados que indiquen si se está cumpliendo o no con la dilución deseada en los casos en que la pluma aflore a la superficie, mientras que en los casos en que la pluma quede atrapada en una capa media el modelo puede predecir a que profundidad se va a presentar este fenómeno.

4. METODOLOGÍA

4.1. ÁREA DE ESTUDIO

La Bahía de Santa Marta, ubicada entre los $11^{\circ}13'00''$ y $11^{\circ}15'30''$ de latitud norte y $74^{\circ}12'30''$ y $74^{\circ}14'30''$ de longitud oeste, presenta un área de 5 km² aproximadamente y una profundidad promedio de entre 20 y 40 metros, en general se puede caracterizar como una bahía abierta en dirección oeste con límites entre Punta Gaira en el sur oeste y Punta Betín, aunque en el presente estudio se incluyeron las playas de Taganga y Playa grande, abarcando hasta Playa granate como límite noreste.

El área de estudio se encuentra en una zona climática de carácter árido con pocas precipitaciones (de 300 a 500 mm/a), la cual presenta dos épocas secas: de diciembre a marzo y de junio a agosto; y dos épocas húmedas: de abril a mayo y de septiembre a noviembre. Otra de las características de la BSM es la influencia de la desembocadura del río Magdalena y de la Ciénaga Grande de Santa Marta gracias a las contracorrientes del golfo de Panamá.

En los primeros meses del año la temperatura superficial del agua presenta los valores más bajos con promedios mensuales multianuales de 26.2 y 24.2 °C, con máximos en diciembre 28.4°C y mínimos en febrero 22.8°C, entre los meses de mayo y noviembre los promedios varían entre 29.3 y 27.4°C (Altamar y Coley, 2007; Rodríguez y Barros, 2007)

4.2. MODELO HIDRODINÁMICO

4.2.1. Información de campo

La batimetría usada para la modelación hidrodinámica fue obtenida de estudios previos realizados en la BSM, en los cuales se había digitalizado las cartas náuticas COL 249, COL 244 y COL 298 del centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas (CIOH). De allí se partió a usar un archivo de modelación digital de terreno con el Golden Software Surfer 9, el cual sería introducido al modelo.

Los modelos de superficie libre y de corrientes fueron obtenidos de datos medidos en campo disponibles en la zona de estudio durante los meses de julio y agosto de 2008, estos datos fueron medidos con equipos Recorder Current Metter (RCM9) y Water Level Recorder (WLR7) marca AANDERAS pertenecientes al Grupo de Control de la Contaminación Ambiental de la Universidad del Magdalena. Estos equipos fueron instalados en dos puntos de la BSM, como se muestra en la Figura 1.

La estación para la colocación de los equipos mareográficos fue seleccionada según la facilidad de acceso y la logística proporcionada por la Capitanía de Puerto del distrito de Santa Marta, en el punto de medición se registró una profundidad de 26 metros. La ubicación de la estación se puede observar en la Figura 2.

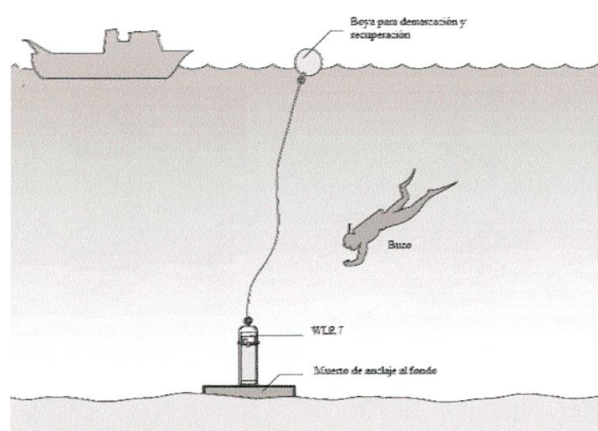


Figura 1. Instalación del equipo WLR7

La instalación del equipo RCM9 es similar a la observada en la Figura 1; con la diferencia que el equipo WLR7 fue emplazado a un lastre de concreto sujetándolo al fondo marino, mientras que el correntómetro RCM9 se colocó suspendido entre una boya y el muerto de anclaje para poder medir la corriente del agua a $2/3$ de la profundidad de la columna de agua; lo cual realiza por métodos acústicos.

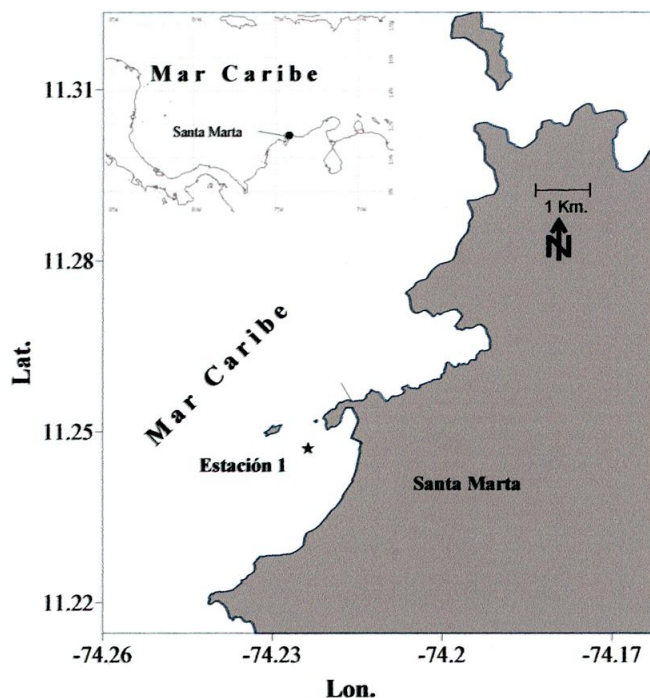


Figura 2. Estación de medición de datos oceanográficos mediante los equipos WLR7 y RCM9

4.2.1.1. Información Meteorológica

La información meteorológica necesaria para la modelación hidrodinámica (vientos, precipitación y evaporación) se obtuvo de la red meteorológica del instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, IDEAM ubicada en el aeropuerto Simón Bolívar de la ciudad de Santa Marta.

Fueron seleccionados datos representativos durante todo el año 2008, para lo cual se realizaron 24 paquetes de datos, cada uno correspondiente a tres días de información meteorológica medida cada 15 minutos. Las fechas en las cuales se tomaron los datos meteorológicos se muestra en la Tabla 1, la misma fue analizada mediante rosas de vientos y relacionando la información meteorológica con los resultados de los demás modelos usados en el presente estudio; adicionalmente se realizaron histogramas de la distribución de la velocidad del viento en el tiempo; los análisis de estos datos serán presentados más adelante.

Tabla 1. Fechas para extracción de datos meteorológicos

Mes	Set o Paquete de Datos	Fechas	
		Desde	Hasta
Enero	1	4/01/2008	6/01/2008
Enero	2	16/01/2008	18/01/2008
Enero	3	27/01/2008	29/01/2008
Febrero	4	14/02/2008	16/02/2008
Febrero	5	26/02/2008	28/02/2008
Marzo	6	14/03/2008	16/03/2008
Marzo	7	30/03/2008	1/04/2008
Abril	8	14/04/2008	16/04/2008
Abril	9	29/04/2008	1/05/2008
Mayo	10	14/05/2008	16/05/2008
Mayo	11	30/05/2008	1/06/2008
Junio	12	14/06/2008	16/06/2008
Junio	13	29/06/2008	1/07/2008
Julio	14	11/07/2008	13/07/2008
Julio	15	28/07/2008	30/07/2008
Agosto	16	16/08/2008	18/08/2008
Agosto	17	28/08/2008	30/08/2008
Septiembre	18	12/09/2008	14/09/2008
Septiembre	19	27/09/2008	29/09/2008
Octubre	20	14/10/2008	16/10/2008
Octubre	21	28/10/2008	30/10/2008
Noviembre	22	12/11/2008	14/11/2008
Noviembre	23	27/11/2008	29/11/2008
Diciembre	24	14/12/2008	16/12/2008

4.2.2. Modelo Computacional

El modelo computacional usado fue el modulo hidrodinámico 3D del Sistema Base Hidrodinámica Ambiental SisBaHia®, El dominio de simulación fue seleccionado como una formación redondeada con una frontera abierta, tal como se muestra en la Figura 3 .

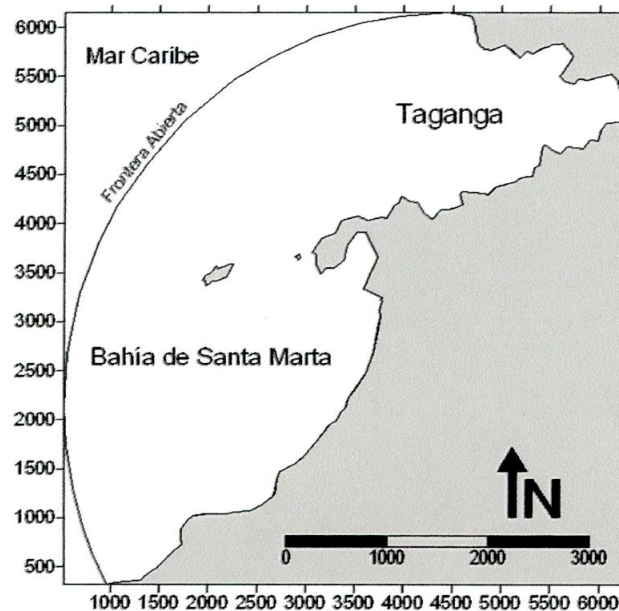


Figura 3. BSM y dominio de simulación.

Para la discretización del dominio se probaron tres mallas con diferentes resoluciones con el fin de averiguar cuál de las tres mallas era la más adecuada para el análisis computacional, ya que es de suponer que entre más fina sea la resolución de la malla, más largos serán los costos computacionales (horas) para el funcionamiento del modelo. Para la construcción de las mallas fue usada una serie de rutinas para Matlab 7, las cuales realizan la triangulación de puntos en el plano xy con el algoritmo de Delaunay (Persson y Strang 2004). Fueron usadas mallas no estructuradas de elementos triangulares, debido a que este tipo de mallas se adaptan mejor a contornos irregulares de la línea costera, la flexibilidad de las mallas no estructuradas permite lograr resoluciones altas en regiones de interés (Hanerta *et al.*, 2005).

Para controlar la calidad de la malla se empleó el algoritmo propuesto por Persson y Strang (2004) que ajusta la equilateralidad de los triángulos producidos, lo cual es una propiedad deseada para resolver ecuaciones diferenciales parciales por el método de los Elementos Finitos, dicho algoritmo se puede ver en detalle en el estudio de García, García y Palacio

(2009). La calidad en la construcción de las mallas depende de la magnitud de los ángulos de los elementos que la conforman, si se ajustan todos los ángulos a 60° se lograrán buenos resultados numéricos con la malla construida.

Field (2000) discute varias formas de medir la calidad de mallas no estructuradas de elementos finitos. Para las mallas diseñadas en el presente estudio se usó como criterio de calidad (q) el doble de la relación entre el círculo más grande inscrito y el más pequeño circunscrito en cada elemento, tal como lo expresa la siguiente fórmula matemática.

$$q = 2 \frac{\eta_n}{r_{out}} = \frac{(b+c-a)*(c+a-b)*(a+b-c)}{abc} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde a , b y c son las longitudes de los lados del triángulo que forman el elemento en cuestión. Un triángulo equilátero tiene un $q = 1$ mientras que uno degenerado (área cero) tiene un $q = 0$. Para asegurar buenos resultados se usó como regla un $q > 0.5$.

La malla usada fue seleccionada con una resolución relativamente gruesa, que no afectara la representatividad de los resultados del modelo. Dicha malla consta de 377 elementos triangulares y 845 nodos, con 129 en la frontera de tierra y 55 en la frontera abierta del dominio de simulación. La malla cubre un área total de 18.527.717 m² y un volumen de 1.057.468.893 m³, con una profundidad media de 57,75 metros.

Se realizó por periodos de 5 días (432.000 segundos) en los cuales se presentara la variación de mareas más amplia y más baja dentro de los meses de julio y agosto de 2008, en las fechas comprendidas entre el 20 y el 25 de julio presentan las mareas bajas y las fechas comprendidas entre el 28 de julio y el 1 de agosto el periodo de mareas altas.

Uno de los factores críticos que afectan la precisión de los modelos para estuarios y zonas costeras es la especificación de las condiciones en las

fronteras abiertas (Yang y Hamrick, 2005). Para el caso de las simulaciones con forzante de marea astronómica se utilizó información disponible de mediciones directas en la zona de estudio, las cuales estaban disponibles para los meses de julio y agosto de 2008, de estas mediciones se realizó un análisis de constituyentes de marea para introducirlas en el modelo de simulación como condiciones de frontera abierta,

El modelo hidrodinámico aquí descrito se constituye en el modelo base para la posterior realización de la modelación de calidad de agua y la modelación del emisario submarino a través del modelo Lagrangeano de lanzamiento de partículas; por esta razón se puede decir que las condiciones como el dominio y los escenarios de simulación que se describen en esta sección aplican para la estructura metodológica de los modelos antes mencionados.

4.2.3. Análisis de Sensibilidad a Parámetros Físicos y Numéricos del Modelo

Debido a la complejidad del modelo computacional hidrodinámico, es necesario realizar corridas preliminares para saber cuáles de los parámetros físicos y numéricos del modelo pueden tener influencia sobre los resultados de la simulación, y si la tienen, determinar en qué medida influye en las variables como la altura del nivel del mar y la velocidad de la corriente, las cuales tienen una importancia neurálgica en la interpretación de los resultados del modelo hidrodinámico y a su vez son base para la aplicación de los otros modelos usados en el presente estudio.

4.2.3.1. Parámetros Físicos

Dentro de los parámetros físicos que podrían presentar influencia en los resultados de la modelación se encuentran la rugosidad de fondo y la presencia o ausencia de vientos. La rugosidad de fondo se evaluó a través de la variación del coeficiente de rugosidad n de Manning, dentro de valores adecuados para fondos marinos como los de la BSM. Para la presencia y ausencia de vientos fueron usados datos meteorológicos disponibles de la

estación meteorológica del aeropuerto Simón Bolívar de la ciudad de Santa Marta.

4.2.3.2. Parámetros Numéricos

El principal parámetro numérico que podría tener influencia sobre los resultados del modelo es el paso de tiempo, por esta razón se realizó un análisis de sensibilidad para este parámetro, probando con pasos de tiempo de 25, 50, 75, 100 y 150 segundos. La sensibilidad del modelo se vería representada por variaciones bruscas en la curva de mareas, sumado al hecho que el número de Courant medio debía estar entre 3 y 8 para garantizar la fiabilidad de los datos obtenidos.

4.2.4. Calibración del Modelo

La calibración del modelo hidrodinámico se realizó en primer lugar ajustando los niveles de superficie libre (marea). En el caso de las corrientes superficiales se calibró el modelo teniendo en cuenta datos meteorológicos de vientos con magnitudes y direcciones variables en el tiempo, con distribución permanente sobre todo el dominio de simulación.

El proceso de calibración de modelos computacionales se realizó por el método del ensayo – error, a través del ajuste de los datos medidos en campo con los datos calculados por el modelo computacional, hasta que este ajuste resultara en una aproximación con menos del 5% del error medio cuadrático (RMS por sus siglas en ingles); este parámetro es usado en la magnitud del nivel de superficie libre y en la magnitud de la velocidad de la corriente.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(valor\ calculado)_i - (valor\ medido)_i]^2}{N}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Posterior a la calibración del modelo se realizó una simulación a largo plazo para corroborar y validar los resultados en cuanto a variables hidrodinámicas; esta corrida se decidió realizar por los dos meses en los cuales se poseían

datos de mediciones de campo para variables como nivel relativo del mar y velocidad de la corriente.

4.2.5. Escenarios de simulación

Fueron efectuadas veinticuatro simulaciones hidrodinámicas de acuerdo a las fechas y datos meteorológicos mostrados en la Tabla 1, dichos datos corresponden a las 24 corridas del modelo hidrodinámico; las cuales iniciaron a las 00:00 horas del primer día y terminaron a las 24:59 del tercer día, estas simulaciones fueron la base para el modelo Lagrangeano de transporte de partículas y el modelo de estratificación vertical, esta situación será descrita con detalle más adelante.

4.3. MODELO DE CALIDAD DEL AGUA

4.3.1. Información de campo

Para el modelo de calidad del agua se tomó como parámetros de calibración la salinidad y la temperatura. Esta información fue analizada información recolectada en muestreos semestrales realizados por el Grupo de Control de la Contaminación Ambiental (GCCA) para los años 2005, 2006 y 2007, junto con los resultados de los monitoreos realizados por Metroagua S.A. E.S.P. en toda el área de estudio para estas mismas fechas; adicionalmente, la información de entrada al modelo se complementó con datos obtenidos gracias al método de sensoramiento remoto disponibles en la base de datos del proyecto RTOFS para el atlántico del Centro de Modelación Ambiental (EMC por sus siglas en ingles) del National Weather Service de estados unidos.

4.3.2. Escenarios de Simulación

El modelo de calidad del agua fue desarrollado en las condiciones de calibración del modelo hidrodinámico, es decir se realizaron dos simulaciones para las fechas de mayor y menor amplitud de la marea dentro del rango de

mediciones de datos de campo indicado en la sección 4.2.1., estas simulaciones fueron analizadas mediante graficas de la distribución vertical de temperatura, salinidad y densidad del agua en el sitio de vertimiento del emisario submarino existente en la BSM.

4.4. MODELO LAGRANGEANO DE TRANSPORTE DE PARTÍCULAS

Posteriormente al modelado de la hidrodinámica se implementó el modelo Lagrangeano de lanzamiento y transporte de partículas descrito en la sección 3.4.3, para analizar la distribución de la pluma de contaminación del emisario submarino de la BSM y su circulación como modelo del campo cercano.

La información de entrada al modelo correspondiente a la estructura física del emisario fue proporcionada por la empresa Metroagua S.A. E.S.P. gracias a las memorias de diseño de dicha estructura, los datos de caudal y concentración se encontraban disponibles por estudios realizados previamente por el GCCA de la Universidad del Magdalena.

4.5. MODELO DE ESTRATIFICACIÓN VERTICAL PLUM3

El modelo PLUM3 fue manejado en el entorno computacional de Matlab 7.0., los datos de entrada al modelo consisten en información que describe la distribución vertical de la velocidad de la corriente, la salinidad y la temperatura, para la zona específica del vertimiento del emisario submarino la cual según la malla usada se encontraba situada en el nodo N° 323.

Los datos de velocidad de corriente en la columna de agua fueron extraídos del modelo hidrodinámico mencionado en el numeral 3.4.1. mientras que, la información de salinidad y temperatura en la columna de agua fue extractada del modelo de transporte Lagrangeano descrito con detalle en la sección 4.4.

5. RESULTADOS

Los resultados del presente proyecto se presentan a continuación divididos en diferentes secciones, a saber: resultados de la calibración, análisis de información meteorológica, resultados del modelo hidrodinámico, resultados del modelo de transporte Lagrangeano y resultados del modelo de calidad de agua. En la Tabla 2 se presentan el número, la fecha de inicio y finalización y la duración de las corridas realizadas.

Tabla 2. Periodos de simulación

Numero de la simulación	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Duración
a	20/07/2008	25/07/2008	5 días
b	28/07/2008	1/08/2008	5 días
1	4/01/2008	6/01/2008	3 días
2	16/01/2008	18/01/2008	3 días
3	27/01/2008	29/01/2008	3 días
4	14/02/2008	16/02/2008	3 días
5	26/02/2008	28/02/2008	3 días
6	14/03/2008	16/03/2008	3 días
7	30/03/2008	1/04/2008	3 días
8	14/04/2008	16/04/2008	3 días
9	29/04/2008	1/05/2008	3 días
10	14/05/2008	16/05/2008	3 días
11	30/05/2008	1/06/2008	3 días
12	14/06/2008	16/06/2008	3 días
13	29/06/2008	1/07/2008	3 días
14	11/07/2008	13/07/2008	3 días
15	28/07/2008	30/07/2008	3 días
16	16/08/2008	18/08/2008	3 días
17	28/08/2008	30/08/2008	3 días
18	12/09/2008	14/09/2008	3 días
19	27/09/2008	29/09/2008	3 días
20	14/10/2008	16/10/2008	3 días
21	28/10/2008	30/10/2008	3 días
22	12/11/2008	14/11/2008	3 días
23	27/11/2008	29/11/2008	3 días
24	14/12/2008	16/12/2008	3 días

En la Tabla 3 se muestran los resultados del análisis de armónicos de marea realizado a las mediciones de superficie libre medidas directamente sobre la BSM desde el 1 de julio de 2008 hasta el 30 de agosto del mismo año, donde se pueden observar los constituyentes de marea más significativos para esta zona en la época mencionada, con sus respectivas amplitudes y fases.

Tabla 3. Constituyentes de marea resultantes del análisis de armónicos.

Constante	Período (s)	Amplitud (m)	Fase (rad)
K2	43082.05	0.0043	0.3608
S2	43200.00	0.0166	0.9795
N2	45570.05	0.0244	1.9932
M2	44714.16	0.0634	2.2661
Q1	96726.08	0.006	3.8706
O1	92949.63	0.0573	4.1275
K1	86164.09	0.092	4.1766
P1	86637.20	0.0276	4.2059
Mf	1180292.29	0.0165	6.1975
Mm	2380713.14	0.0077	6.2083

5.1. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS FÍSICOS Y NUMÉRICOS DEL MODELO

5.1.1. Sensibilidad del modelo al paso de tiempo

El modelo hidrodinámico tres dimensional se ejecutó en ocasiones sucesivas para saber cuáles de sus parámetros físicos y numéricos afectaban la estabilidad y la confiabilidad de sus resultados; en primer lugar se realizaron varias corridas con diferentes pasos de tiempo, para averiguar si éste parámetro numérico del modelo, causaba o no un efecto en la elevación del nivel del mar o en la velocidad de la corriente de una estación ubicada en un punto estratégico de la BSM, el cual se puede observar en la Figura 4.

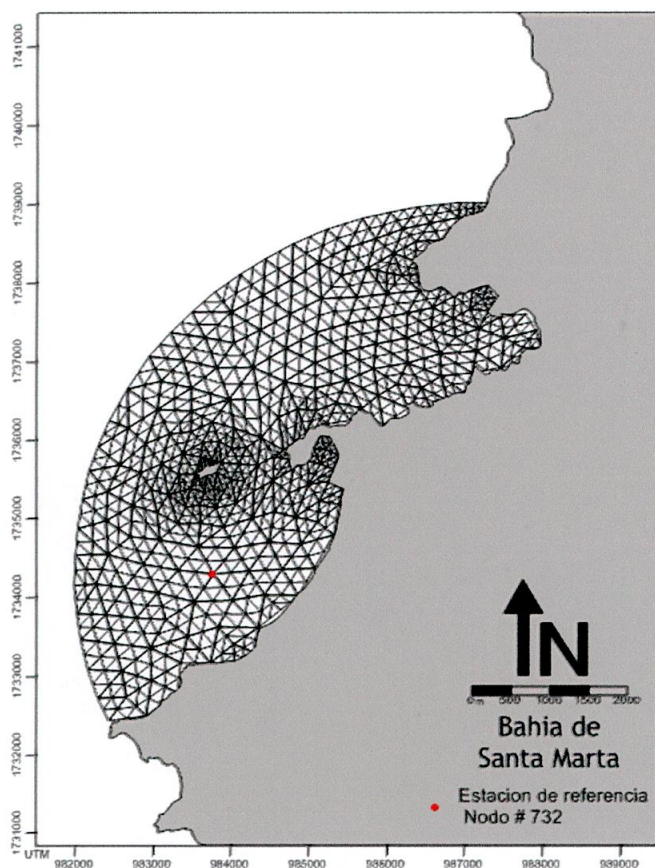


Figura 4. Estación de extracción de datos de la simulación.

La fiabilidad en los cálculos del modelo es determinada a través del número de Courant, este parámetro debe mantenerse en un rango de entre 3 y 8; por esta razón se realiza la comparación entre las diferentes corridas, para ver cuál es el costo computacional más bajo con el que se pueden obtener resultados confiables, esta comparación se puede observar con más detalle en la Tabla 4, de donde se sabe que con un paso de tiempo de 25 s se manejará el modelo de manera rápida y confiable.

Tabla 4. Número de Courant para diferentes pasos de tiempo

Paso de tiempo (s)	Número de Courant medio	Número de Courant máximo
25	5	20.1
50	10.1	40.2
75	15.1	60.4
100	20.1	80.5
150	30.2	120.7

En la Figura 5 se puede observar que en cuanto a la magnitud de la elevación del nivel del mar, el modelo no presenta sensibilidad al paso de tiempo; sin embargo se observa que para pasos de tiempo mayores a 75 segundos el modelo se desestabiliza y presenta un periodo de calentamiento mucho más extenso que cuando se corre con pasos de tiempo relativamente bajos, como 50 o 25 segundos. Por otra parte, en cuanto a la magnitud de la corriente en el dominio de simulación, se puede decir que sí existe una influencia del paso de tiempo; tal como se observa en la Figura 6, para los pasos de tiempo de simulación comprendidos entre 50 y 100 segundos, se presenta una variación inversamente proporcional en los periodos de tiempo comprendidos entre las 6:00 am y las 6:00 pm de cada uno de los 5 días de simulación, para el lapso de tiempo comprendido entre 6:00 pm y 6:00 am no hay sensibilidad, y se mantienen en los picos máximos de velocidad, con valores que varían entre 0.15 y 0.37 m/s. En general, se mantienen las mismas tendencias en la velocidad de la corriente, esto se debe principalmente a que la mayor influencia numérica sobre esta variable está dada por la intensidad de la velocidad del viento, la cual a su vez depende de la hora del día; por esta razón se pueden evidenciar velocidades mayores en las horas de la tarde – noche, de 6:00 pm en adelante.

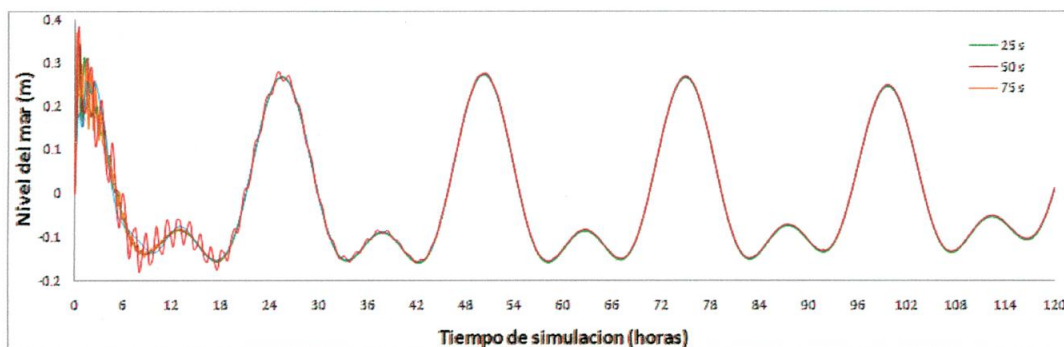


Figura 5. Sensibilidad de la elevación del nivel del mar a la variación del paso de tiempo del modelo hidrodinámico 3d.

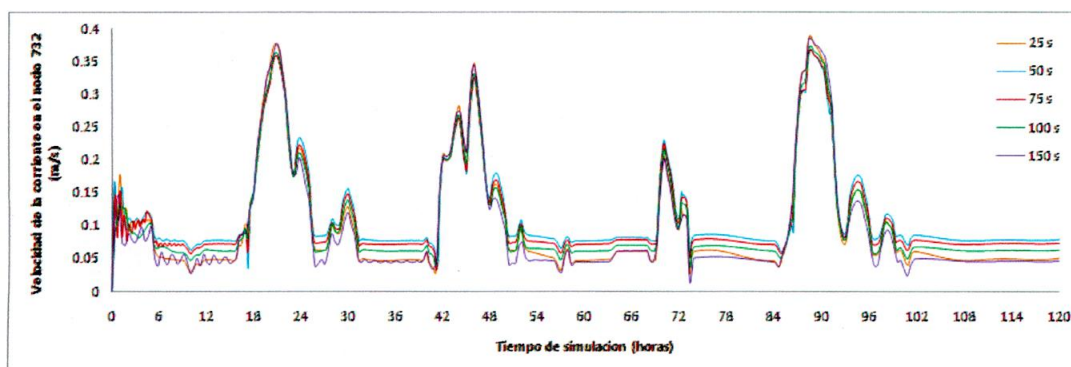


Figura 6. Sensibilidad de la velocidad de la corriente a la variación del paso de tiempo del modelo hidrodinámico 3d.

5.1.2. Sensibilidad del modelo a la presencia y ausencia de vientos variables en el tiempo

Los resultados del análisis de sensibilidad del viento sobre el modelo revelaron una fuerte influencia de este parámetro sobre la respuesta del modelo a las corrientes superficiales y una influencia nula sobre el nivel del agua, en la Figura 7 y la Figura 8 se puede observar dicho fenómeno en cuanto a mareas y corrientes respectivamente.

La influencia de los vientos sobre la velocidad y dirección de la corriente disminuye mientras aumenta la profundidad de las capas del modelo hidrodinámico, ya que las velocidades son determinadas principalmente por el flujo de agua causado por la variación en las mareas.

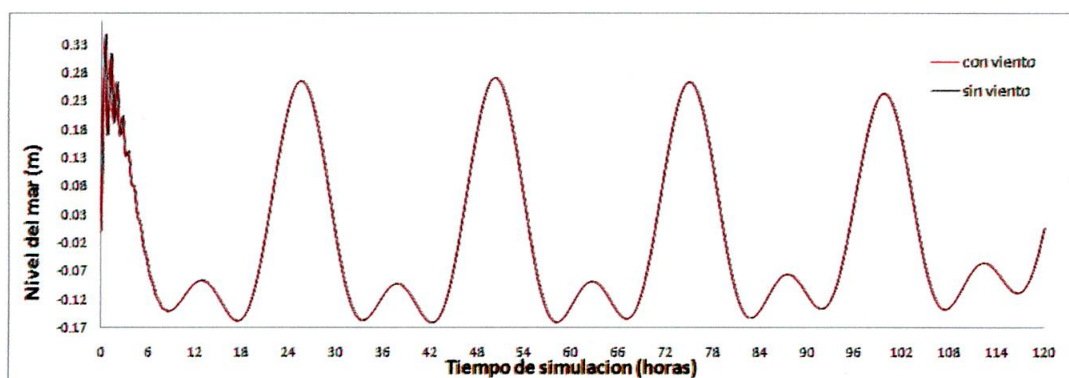


Figura 7. Sensibilidad de la elevación del nivel del mar a la presencia/ausencia de vientos.

En la Figura 8 se evidencia la fuerte influencia de la presencia de vientos en el cálculo de las corrientes superficiales, lo cual es apenas lógico considerando que dentro de la circulación oceánica en zonas de baja variación en el espectro de mareas, tales como la BSM, el factor más influyente sobre las corrientes superficiales es la acción de los vientos. En dicha grafica se observa la congruencia de las dos curvas en ciertos lapsos de tiempo, en los cuales velocidad del viento es relativamente baja (de 0 a 1 m/s), dichos periodos se enmarcan principalmente entre las 6:00 am y las 6:00 pm de cada uno de los 5 días de simulación, para las velocidades en profundidades diferentes no se presento influencia significativa, ya que estas dependen de la batimetría y la variación en la marea, solo la capa más cercana a la superficie se ve influenciada en tal medida por la presencia o ausencia de vientos, al igual que otras variables meteorológicas.

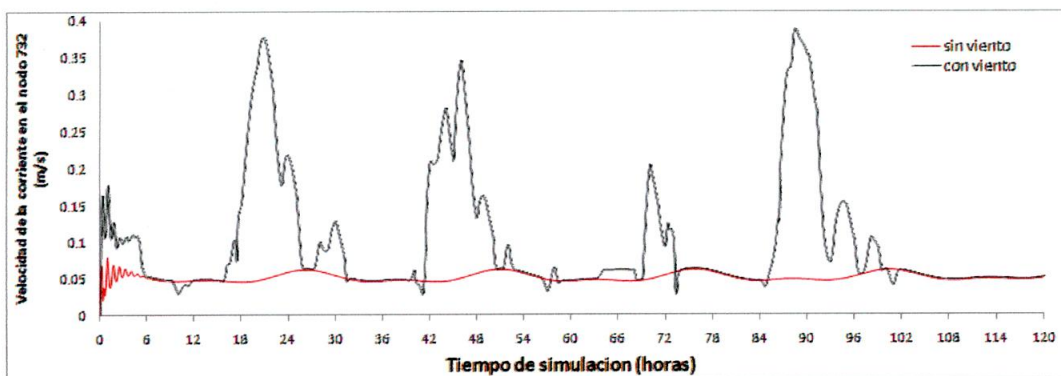


Figura 8. Sensibilidad de la velocidad de la corriente a la presencia y ausencia de vientos.

5.1.3. Sensibilidad del modelo a la rugosidad de fondo, según el coeficiente n de Manning

Se realizaron diferentes corridas del modelo hidrodinámico, con diferentes rugosidades de fondo para saber si este parámetro físico tendría alguna influencia sobre los resultados de la elevación del nivel del mar y de la velocidad de la corriente; los valores probados para el coeficiente n de Manning fueron: 0.015, 0.03, 0.05, 0.09 y 0.15 metros. Para el caso de la

elevación de la marea no se presentó sensibilidad por parte del modelo a dicho parámetro, pero para el caso de la magnitud de la velocidad se presentó una variación inversa de la rugosidad de fondo con respecto a la corriente, es decir; para valores más altos del coeficiente n de Manning se presentan las velocidades más bajas, sin embargo la variación es mínima, ya que la diferencia de velocidades para los picos más altos se enmarca en un rango de 0.28 y 0.38 m/s, como se observa en la Figura 9 para un aumento de un factor de 10 en el coeficiente de Manning (de 0.015 a 0.15) se presentan valores de corrientes disminuidos en una cantidad de 0.1 m/s.

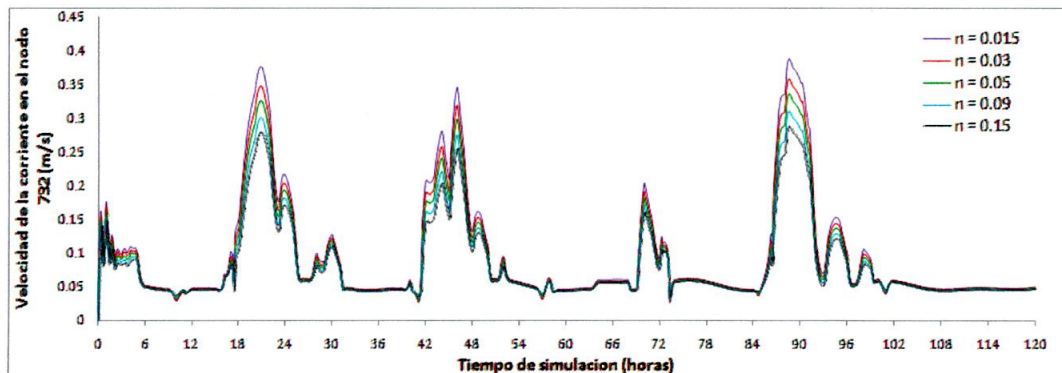


Figura 9. Sensibilidad del modelo a la variación del coeficiente n de Manning, con respecto a la velocidad de la corriente.

5.2. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Para la calibración del modelo hidrodinámico se tomó como parámetro principal la altura del nivel del mar, mediante el enfoque del ensayo – error, se corrió el modelo en ocasiones sucesivas hasta que las mediciones coincidieran con los datos arrojados por el modelo, o presentaran un error de la raíz media cuadrática menor al 5%. Siendo que se tenían mediciones de nivel de marea en la BSM desde el 1 de julio hasta el 31 de agosto del año 2008, se escogieron dos periodos de cinco días en los cuales se presentaran las mareas más altas y más bajas; con el fin de calibrar el modelo en estas dos fechas; las fechas seleccionadas fueron: para el periodo de marea baja

del 20 al 25 de julio de 2008 y para el periodo de marea alta fue el periodo comprendido entre el 28 de julio y el 1 de agosto del mismo año.

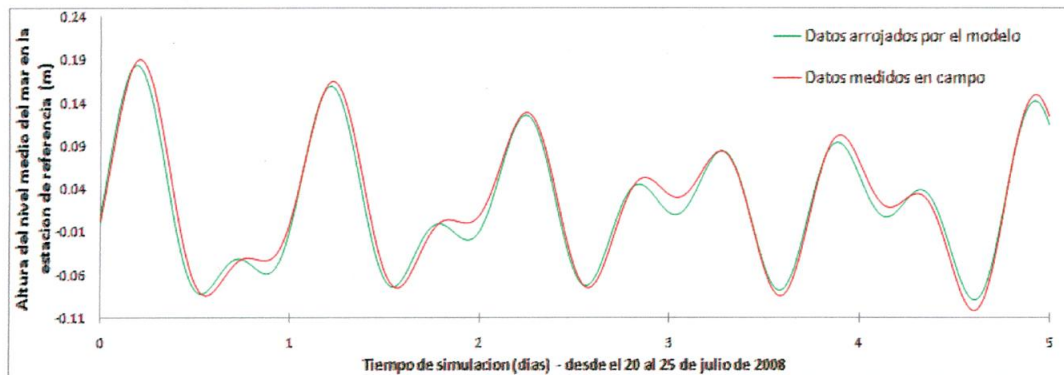


Figura 10. Calibración del modelo en periodo de marea baja simulación "a".

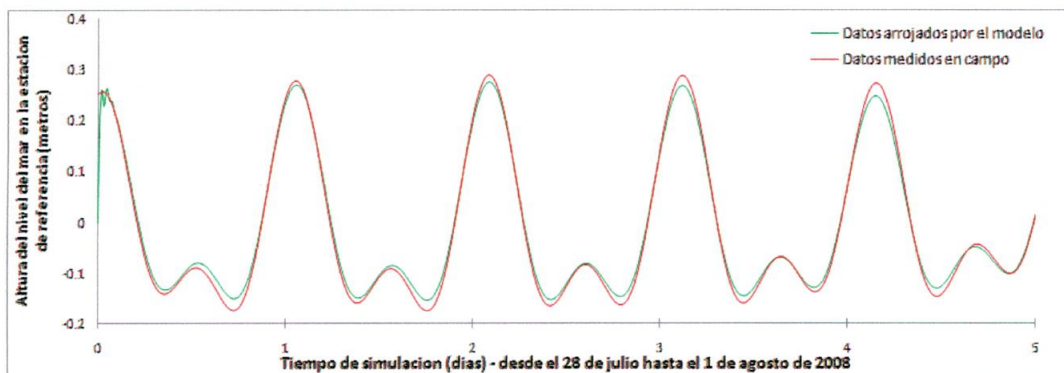


Figura 11. Calibración del modelo en periodo de marea alta, simulación "b".

5.3. ANÁLISIS DE LOS DATOS METEOROLÓGICOS

Fueron realizadas rosas de vientos para cada uno de los paquetes de datos meteorológicos usados en las veinticuatro corridas del modelo hidrodinámico; Dichas graficas se pueden observar en las Figura 12 a Figura 15.

Como se puede observar en la Figura 12 para el mes de enero las direcciones del viento predominantes son NE con velocidades de 0.5 a 2.1 m/s, ENE y E, con velocidades que varían entre 5.7 y 8.8 m/s en la segunda

y tercera corrida, se presenta un porcentaje de calmas relativamente alto, de entre el 14% y 20%.

En febrero (ver Figura 12d y Figura 12e) las calmas fueron del 23% y 17% para la primera y segunda simulación respectivamente, para la corrida del 14, 15 y 16 de febrero se observa que las velocidades más altas (>11.1 m/s) se mantienen en dirección ENE y NNE, pero la dirección predominante del viento es SE con las velocidades más bajas abarcando la mayor parte del tiempo (0.5 a 2.1 m/s), la segunda corrida de febrero, realizada del 26 al 28 de dicho mes muestra una tendencia muy marcada en la dirección ENE con velocidades de entre 2.1 y 3.6 m/s.

Para el mes de marzo la dirección y el rango de magnitud del viento predominantes fueron ENE y 5.7 a 8.8 m/s respectivamente para ambas simulaciones (ver Figura 12f y Figura 13a), siguen presentándose las mayores velocidades (> 11.1 m/s) en las direcciones NE y ENE. En el mes de abril se presentaron nuevamente ENE y 5.7 a 8.8 m/s como la dirección y rango de velocidades predominantes (ver Figura 13b y Figura 13c).

En las Figura 13d y Figura 13e se observa un fenómeno particular, para la corrida del 14 al 16 de mayo se las direcciones predominantes del viento son ENE y WSW, las cuales son totalmente opuestas, en cuanto a las velocidades, predominan las más bajas (0.5 a 2.1 m/s). Para la corrida del 31 mayo al 1 de junio se una situación similar, predominan las direcciones ENE y W con rangos de velocidad de 5.7 a 8.8 m/s y 3.6 a 5.7 m/s respectivamente, se presentaron calmas relativamente bajas entre el 4% y 6% del tiempo.

En el mes de junio se presentan velocidades bajas (0.5 a 2.1 m/s) y prevalece la dirección W para ambas simulaciones, con calmas del 7% y 6% para las corridas del 14 al 16 de junio y del 29 de julio al 1 de julio respectivamente, ver Figura 13f y Figura 14a. En Julio (Figura 14b y c) predominaron las velocidades bajas, de 0.5 a 2.1 m/s, con direcciones

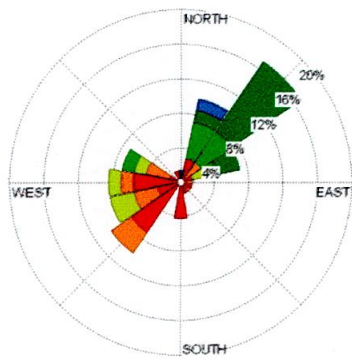
principalmente hacia el SW y el WSW, las calmas fueron de 12.7% para la simulación del 11 al 13 de julio y de 10% para la corrida del 28 al 30 del mismo mes.

En las Figura 14d y Figura 14e se encuentran las rosas de vientos para las simulaciones del mes de agosto, donde se observa claramente la tendencia de los vientos de poca intensidad (0.5 a 2.1 m/s) hacia la dirección WSW, sin embargo en la segunda corrida del mes se observan vientos demarcados hacia la dirección ENE con altas intensidades (5.7 a 8.8 m/s); las calmas fueron relativamente bajas, de 3% y 5.6% para las primera y segunda corrida del mes. En el mes de septiembre (Figura 14f y Figura 15a) se presentaron características similares a las presentadas en agosto; la dirección predominante fue WSW y el rango de velocidades de entre 0.5 y 2.1 m/s aumentando el porcentaje de calmas al 15%.

Octubre presentó direcciones predominantes como WSW y SW, con velocidades de entre 5.7 y 8.8 m/s para la simulación del 14 al 15 de dicho mes y de 0.5 a 2.1 m/s para la segunda simulación (28 al 30 de octubre), se presento baja frecuencia de calmas 7% y 4.2% para la primera y segunda corrida respectivamente, ver Figura 15b y c.

En el mes de noviembre (Figura 15d y e) se presentaron velocidades de entre 2.1 y 3.6 m/s, predominando la dirección WNW en la primera simulación del mes (12 al 14 de noviembre) y WSW en la segunda (28 al 29 de noviembre). Se presentó un alto porcentaje de calmas en ambas corridas, de 15.5% y 26%; aunque menos frecuentes, siguen presentándose las velocidades más altas (8.8 a 11.1 m/s) en la dirección NE.

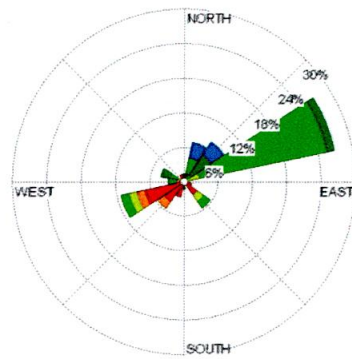
Para diciembre se presentaron velocidades bajas la mayor parte del tiempo, en dirección WSW con magnitudes de entre 0.5 y 2.1 m/s, ver Figura 15f.



WIND SPEED
(m/s)

- >= 11.1
- 8.8 - 11.1
- 5.7 - 8.8
- 3.6 - 5.7
- 2.1 - 3.6
- 0.5 - 2.1

Calms: 19.72%



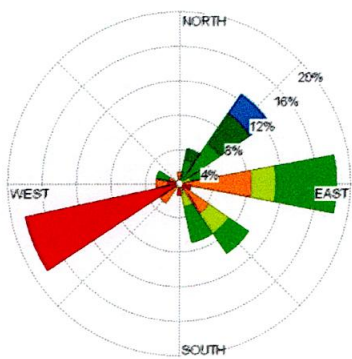
WIND SPEED
(m/s)

- >= 11.1
- 8.8 - 11.1
- 5.7 - 8.8
- 3.6 - 5.7
- 2.1 - 3.6
- 0.5 - 2.1

Calms: 19.72%

(a)

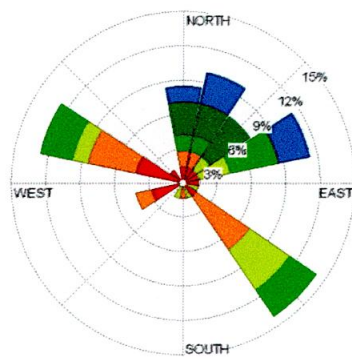
(b)



WIND SPEED
(m/s)

- >= 11.1
- 8.8 - 11.1
- 5.7 - 8.8
- 3.6 - 5.7
- 2.1 - 3.6
- 0.5 - 2.1

Calms: 14.08%



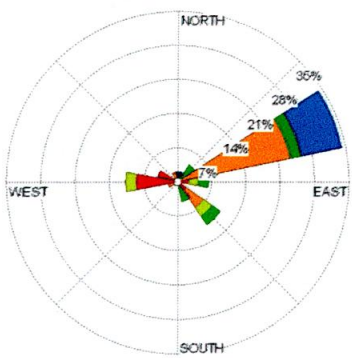
WIND SPEED
(m/s)

- >= 11.1
- 8.8 - 11.1
- 5.7 - 8.8
- 3.6 - 5.7
- 2.1 - 3.6
- 0.5 - 2.1

Calms: 23.94%

(c)

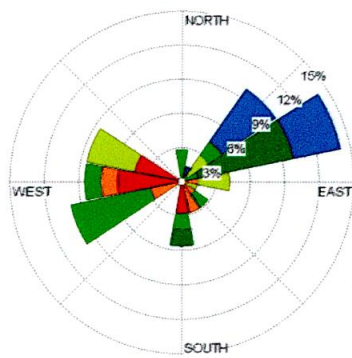
(d)



WIND SPEED
(m/s)

- >= 11.1
- 8.8 - 11.1
- 5.7 - 8.8
- 3.6 - 5.7
- 2.1 - 3.6
- 0.5 - 2.1

Calms: 17.02%



WIND SPEED
(m/s)

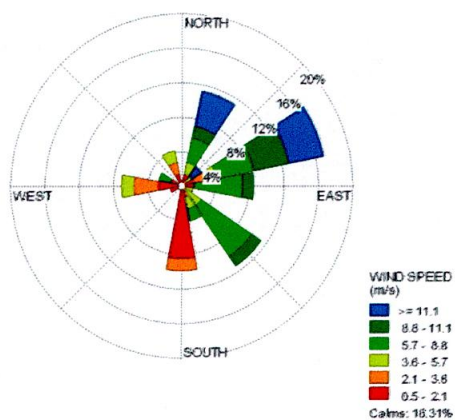
- >= 11.1
- 8.8 - 11.1
- 5.7 - 8.8
- 3.6 - 5.7
- 2.1 - 3.6
- 0.5 - 2.1

Calms: 28.17%

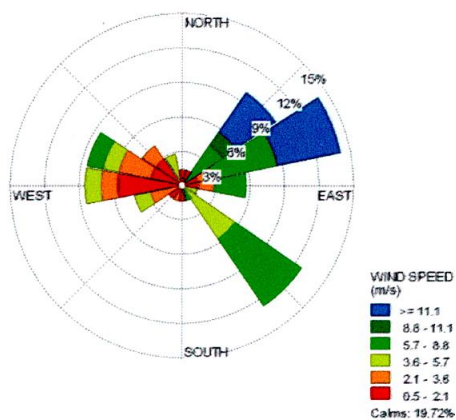
(e)

(f)

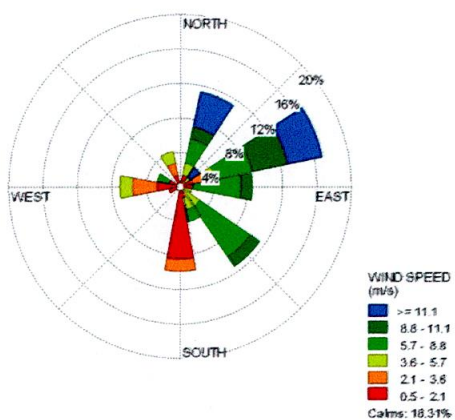
Figura 12. Rosas de vientos para las simulaciones 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d), 5 (e) y 6 (f).



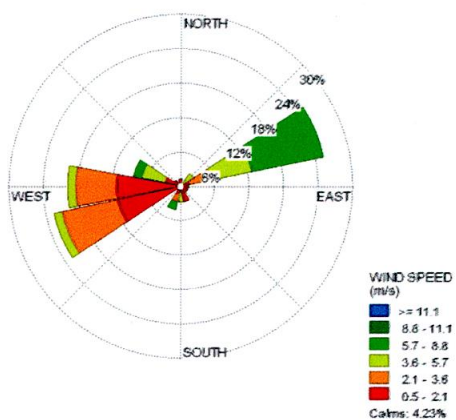
(a)



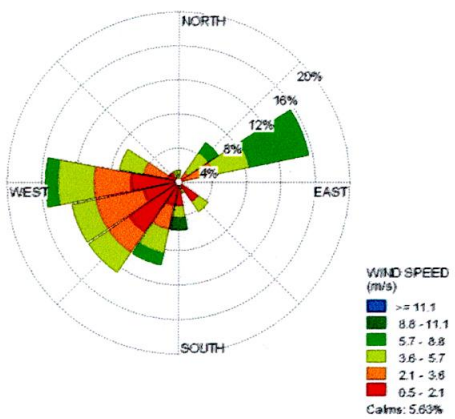
(b)



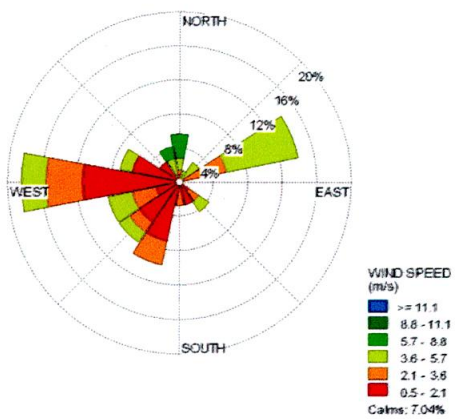
(c)



(d)

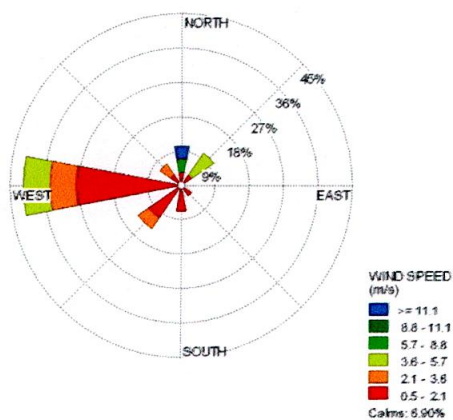


(e)

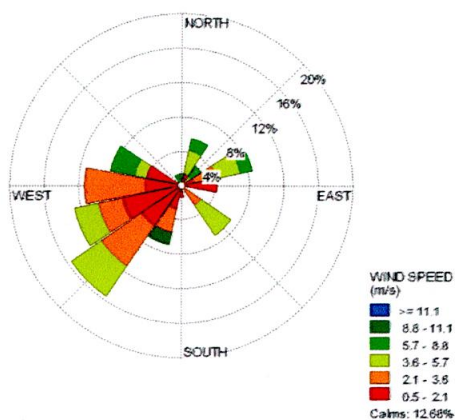


(f)

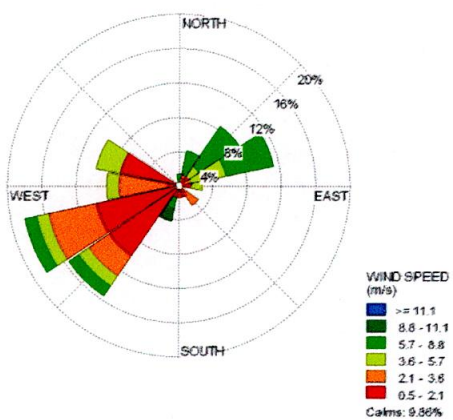
Figura 13. Rosas de vientos para las simulaciones 7 (a), 8 (b), 9 (c), 10 (d), 11 (e) y 12 (f).



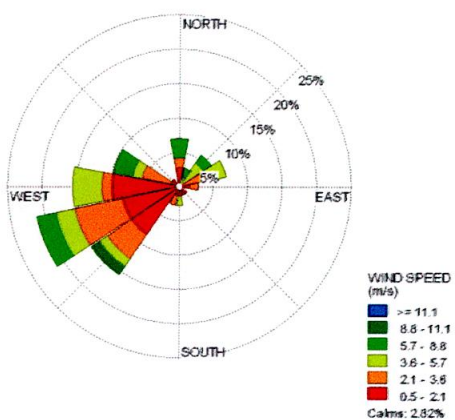
(a)



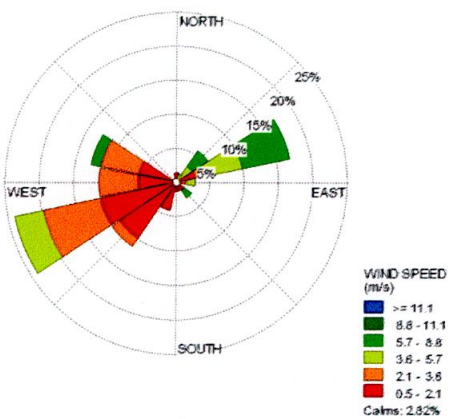
(b)



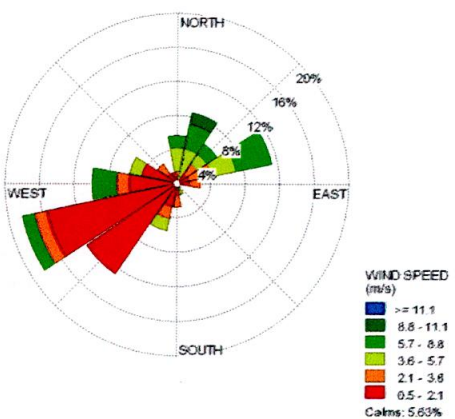
(c)



(d)

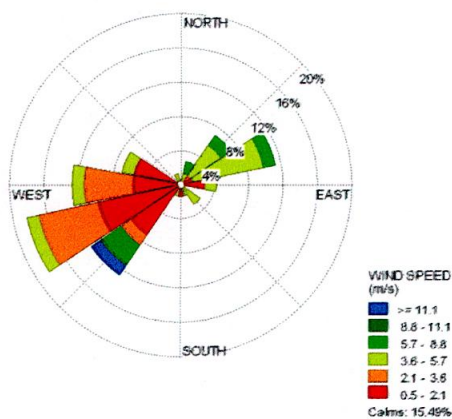


(e)

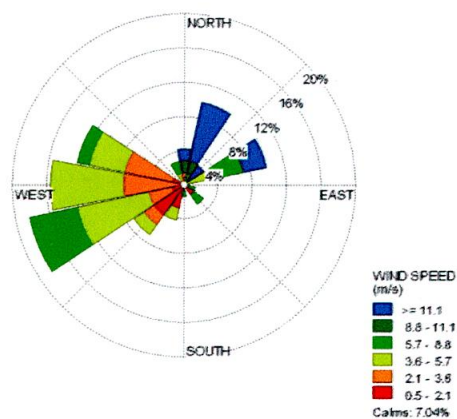


(f)

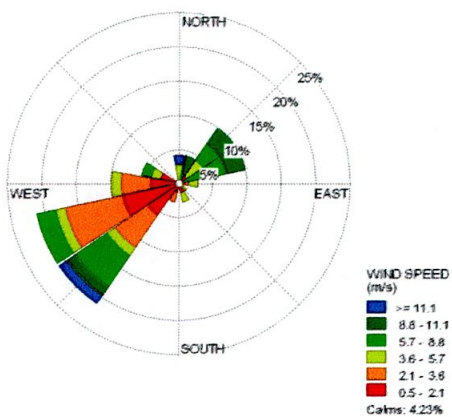
Figura 14. Rosas de vientos para las simulaciones 13 (a), 14 (b), 15 (c), 16 (d), 17 (e) y 18 (f).



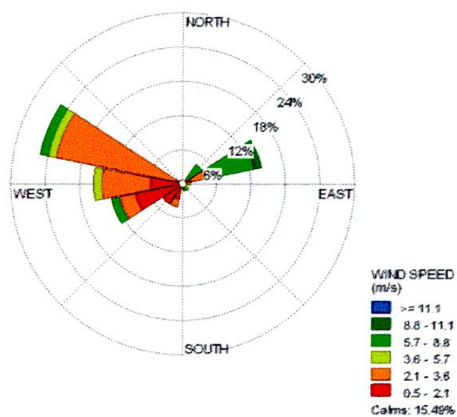
(a)



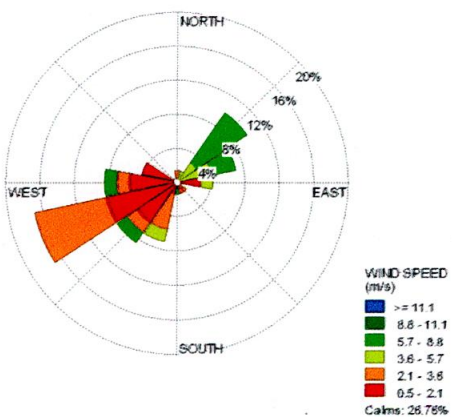
(b)



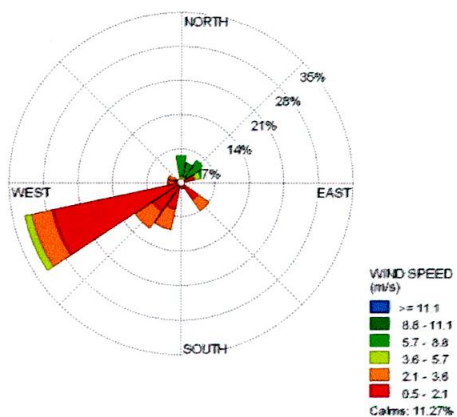
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 15. Rosas de vientos para las simulaciones 19 (a), 20 (b), 21 (c), 22 (d), 23 (e) y 24 (f).

5.4. SIMULACIONES HIDRODINÁMICAS

En las 24 simulaciones del modelo hidrodinámico comprendidas entre la Figura 16 y Figura 39 se observan distintos comportamientos de la marea, la velocidad de la corriente en tres niveles de la columna de agua; superficie, profundidad media y fondo. Las corridas fueron fechadas según su concordancia con los datos meteorológicos mostrados en la Tabla 1 de la sección 4.2.1.1.

Para las primeras 8 simulaciones se presentan comportamientos similares principalmente en los picos más altos de la marea y en la velocidad de la corriente en la superficie del mar, los cuales se presentan a los 0.5, 1.5 y 2.5 días en donde por lo general los picos altos y bajos de la marea coinciden con las corrientes superficiales más intensas (ver Figura 16 a Figura 23). La velocidad de la corriente en la profundidad media y en el fondo del mar muestran frecuentemente las mismas tendencias, en primer lugar picos altos asociados a los valores más altos de la marea y de la velocidad de la corriente en la superficie y en segundo lugar un comportamiento muy irregular sin picos pronunciados durante la mayor parte del tiempo de simulación.

Los valores máximos de la marea se observan en las Figura 16, Figura 17 y Figura 19 con niveles cercanos a los 0.3 metros, mientras que el pico más alto de la velocidad de la corriente en la superficie es de 0.6316 m/s en la séptima corrida (figura 26), en la misma se presenta la velocidad más alta de la corriente en una profundidad del mar con un valor aproximado a 0.06 m/s y coincide con el pico más alto dado en la superficie. Los resultados obtenidos de las 8 primeras corridas que muestran comportamientos extremos con picos muy altos y otros muy bajos pueden que estén influenciados por las altas velocidades del viento que predominaron para estos periodos y por los prolongados periodos de calma de hasta un 28%.

En las simulaciones número 9 y 10, ilustradas en las Figura 24 y Figura 25 se pueden considerar como periodos de transición por el comportamiento de las mareas y de las velocidades de la corriente debido a que se observan picos altos cada medio día; en las corridas 11 a la 18 ilustradas en las Figura 26 a Figura 33 se observan como los picos más altos de la marea se trasladan al primer y segundo día de simulación, es decir, se dan cada 24 horas a la media noche.

En general las velocidades de la corriente en la superficie para estas corridas disminuyen presentando un pico máximo que solo alcanzo los 0.4691 m/s como se ilustra en la Figura 28; en contraste las mareas no cambian demasiado y se mantienen niveles cercanos a 0.3 metros en las corridas 13 y 15. Las velocidades de la corriente en una profundidad media no presentan picos pronunciados, sino un comportamiento tendiente a ser constante, con valores cercanos a 0 m/s, mientras que, la velocidad de la corriente en el fondo del mar continua con un comportamiento irregular pero esta vez se observa en las figuras picos acentuados asociados a los picos más altos de la velocidad de la corriente en la superficie.

En la corrida 19 se observa nuevamente un comportamiento atípico con picos altos de la marea durante el medio día y la media noche durante los tres días de simulación, se presentan velocidades bajas en la corriente superficial con un solo valor máximo de 0.4948 m/s cerca de las 12 horas y con velocidades de la corriente en la profundidad media y en el fondo del mar muy bajas.

En las corridas comprendidas entre la número 20 y la 24 los picos altos de la marea se presentan cerca de los 0.5, 1.5 y 2.5 días (12:00 m) en donde el nivel máximo de la marea se mantiene en 0.3 metros. Normalmente las velocidades de la corriente en la superficie no coinciden con los picos más altos de la marea y presentan su pico máximo en la Figura 36 con 0.4741 m/s. Las velocidades en la profundidad media vuelven a presentar picos pronunciados para estas corridas lo cual puede asociarse a que las mareas

más altas se presentaron nuevamente a las 12:00 Horas de cada uno de los días de simulación, mientras que las velocidades de la corriente en el fondo del mar se siguen comportando de manera irregular con picos poco acentuados.

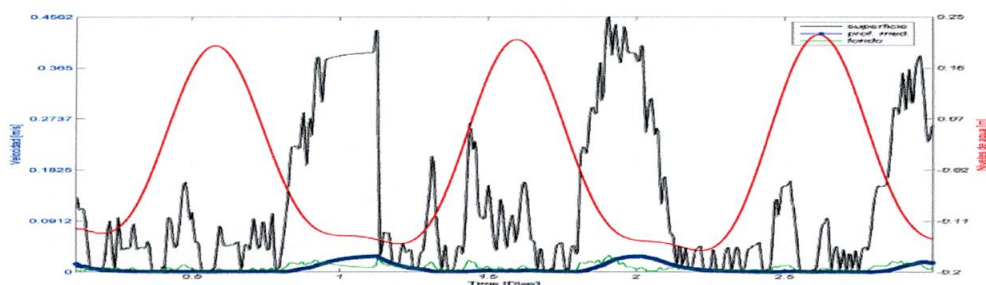


Figura 16. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 1.

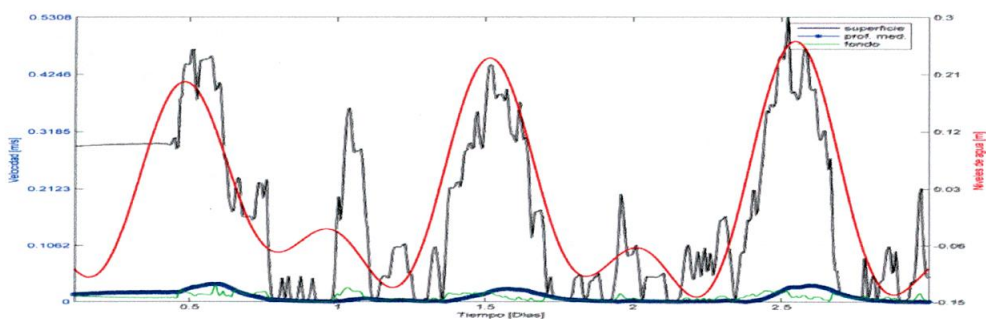


Figura 17. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 2.

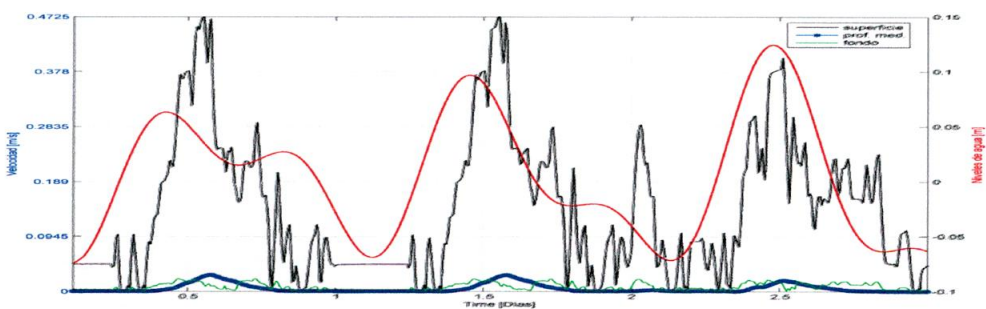


Figura 18. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 3.

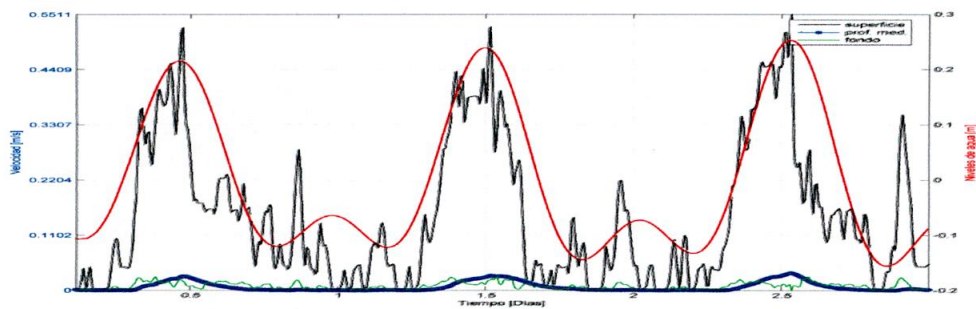


Figura 19 Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 4.

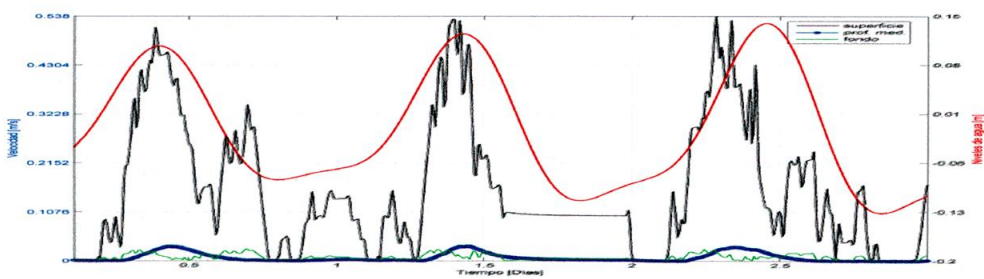


Figura 20. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 5.

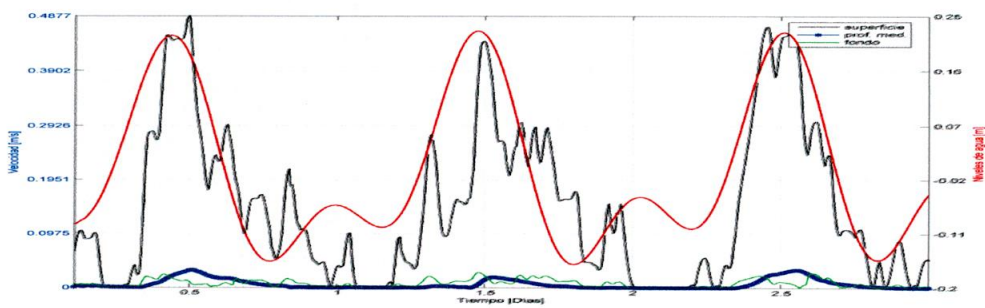


Figura 21. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 6.

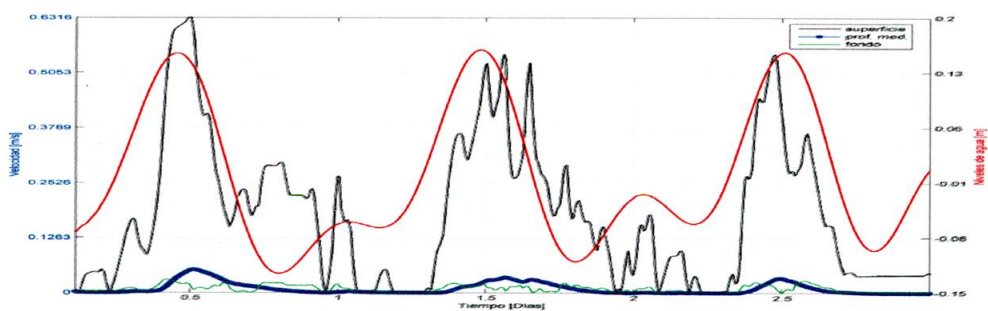


Figura 22. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 7.

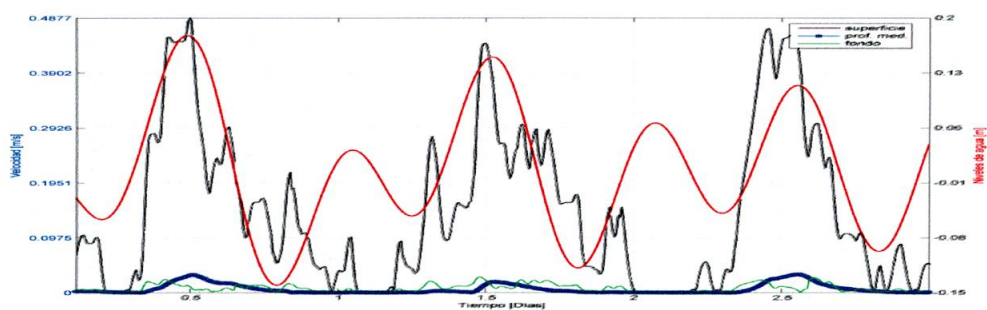


Figura 23. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 8.

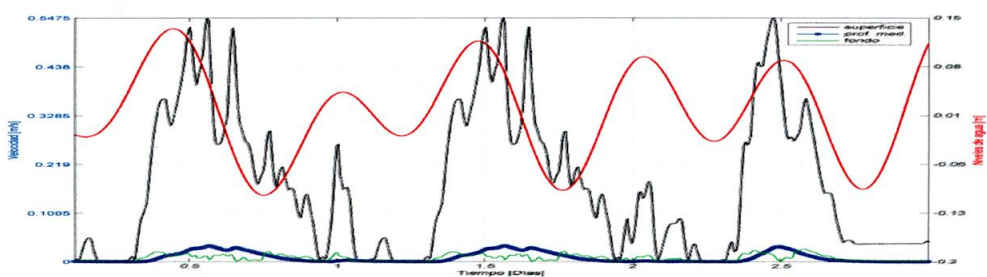


Figura 24. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 9.

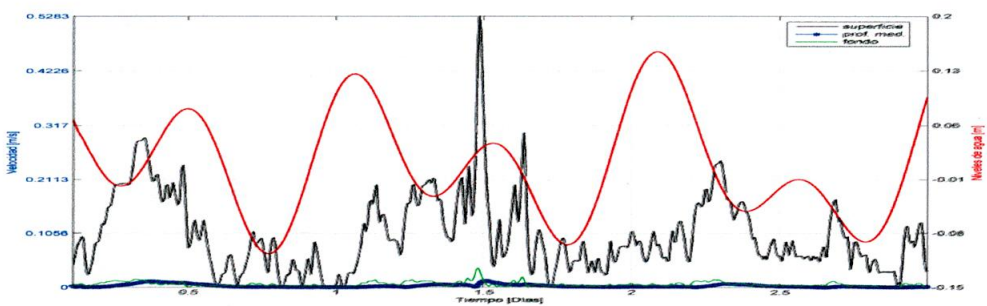


Figura 25. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 10

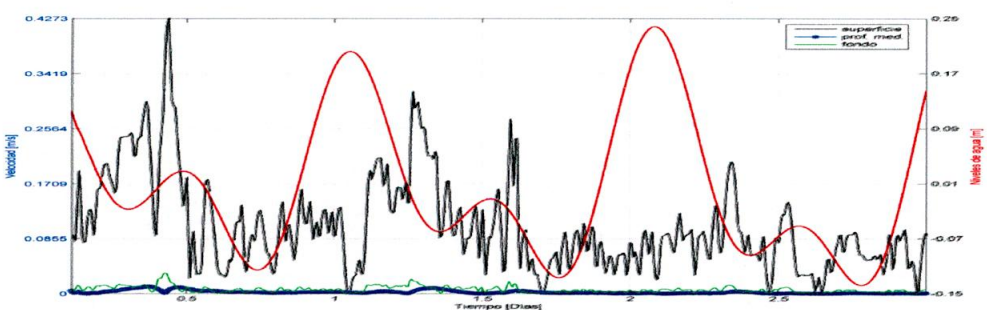


Figura 26. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 11.

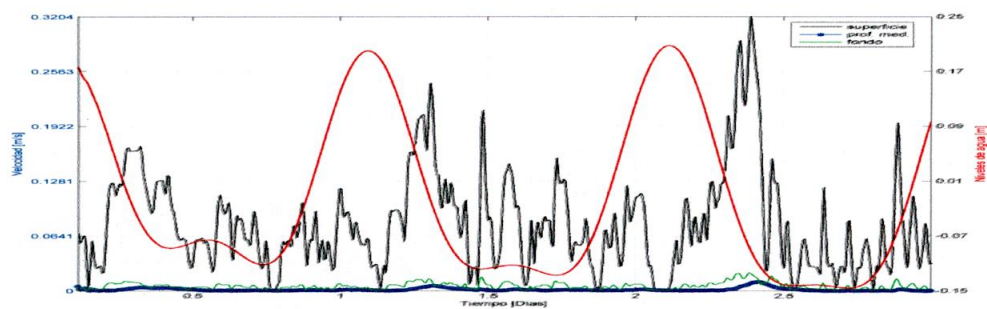


Figura 27. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 12.

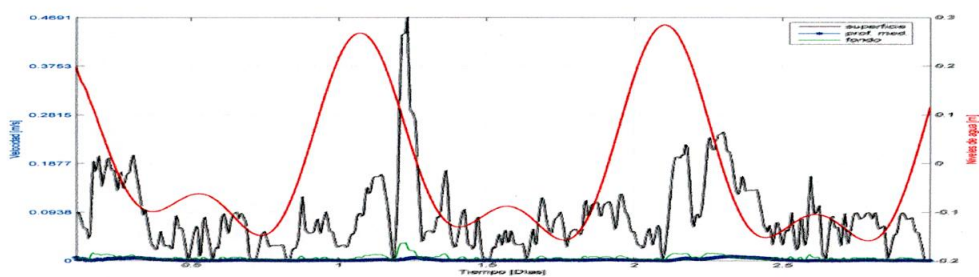


Figura 28. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 13.

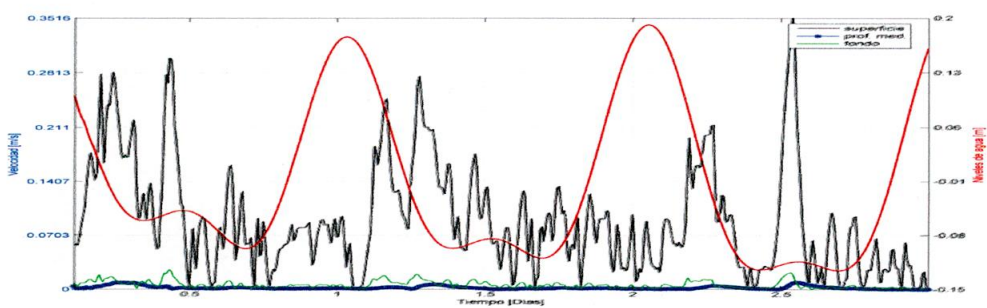


Figura 29. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 14.

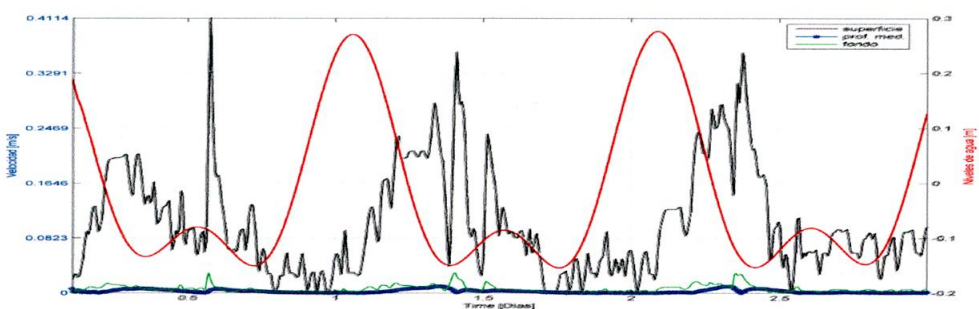


Figura 30. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 15.

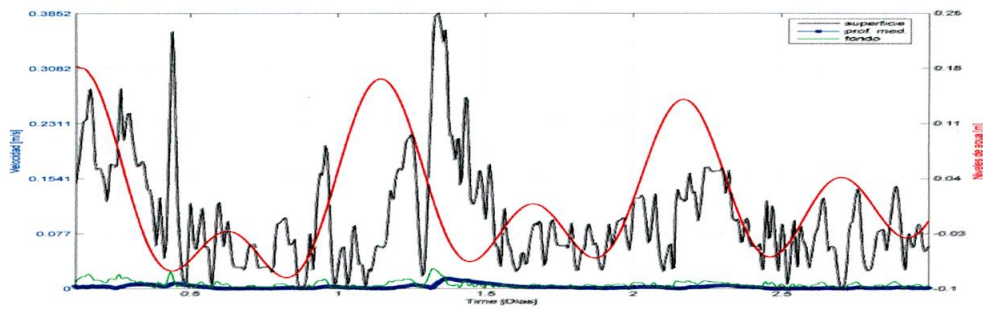


Figura 31. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 16.

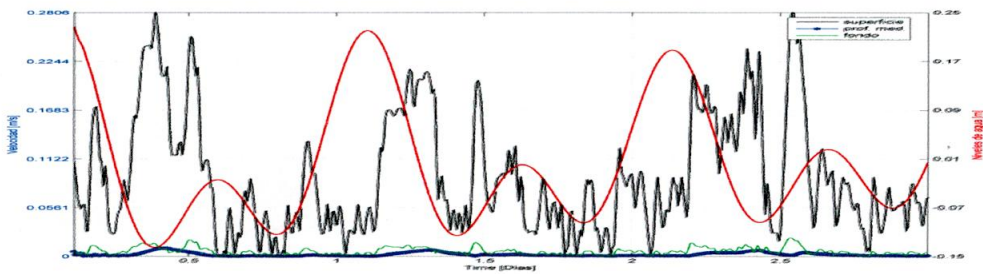


Figura 32. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 17.

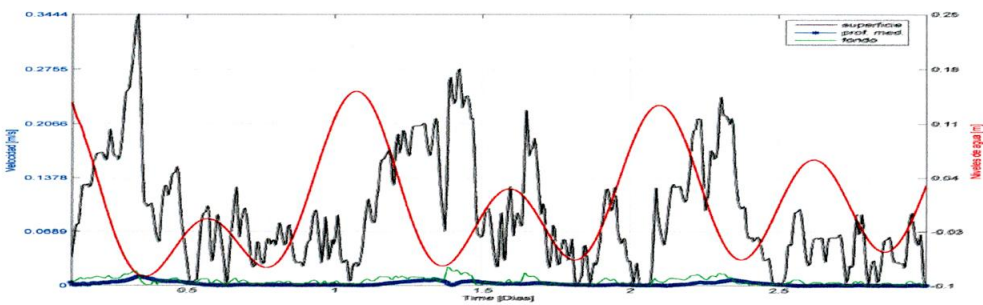


Figura 33. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 18.

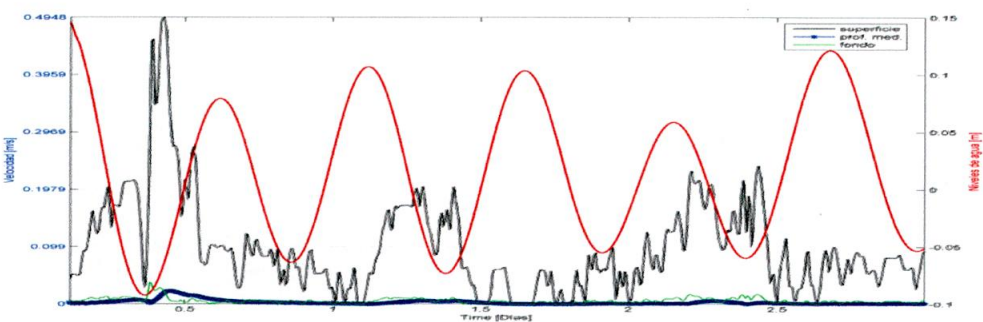


Figura 34. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 19.

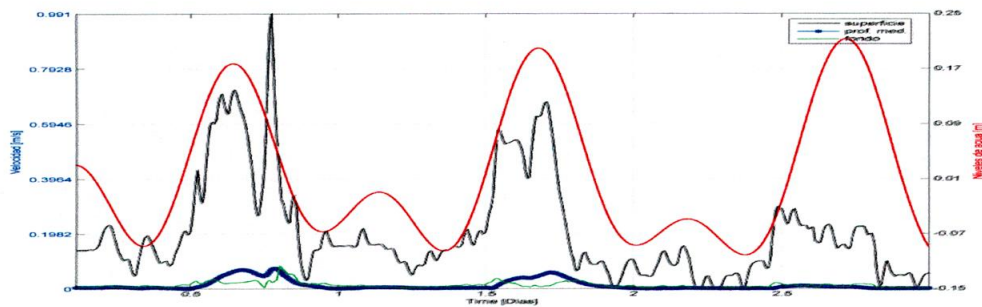


Figura 35. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 20.

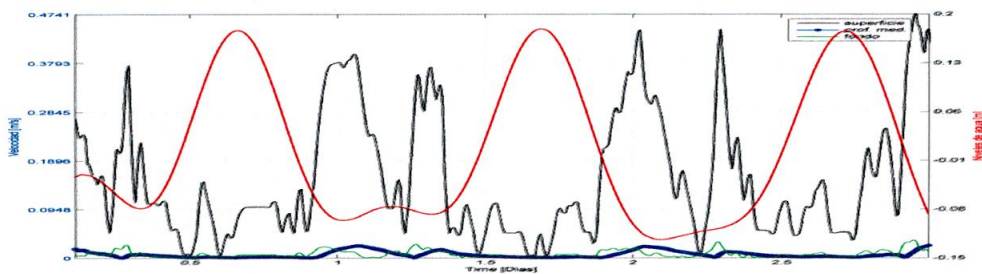


Figura 36. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 21.

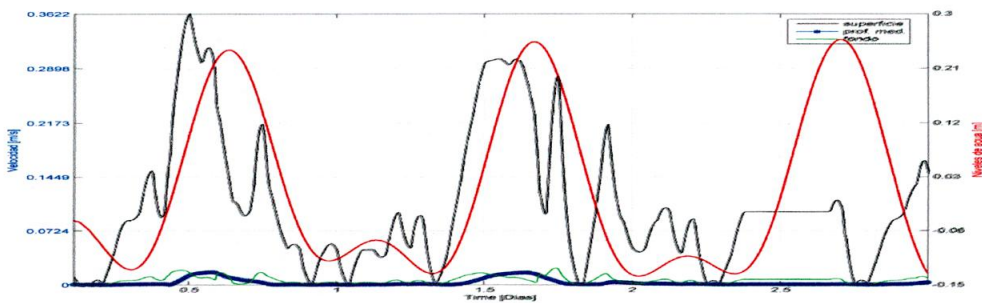


Figura 37. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 22.

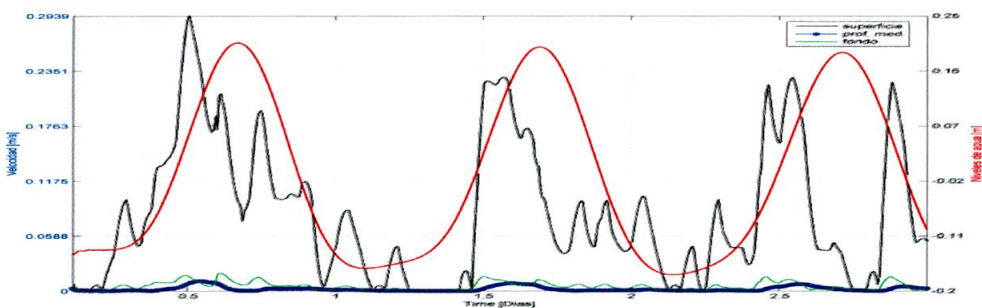


Figura 38. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 23.

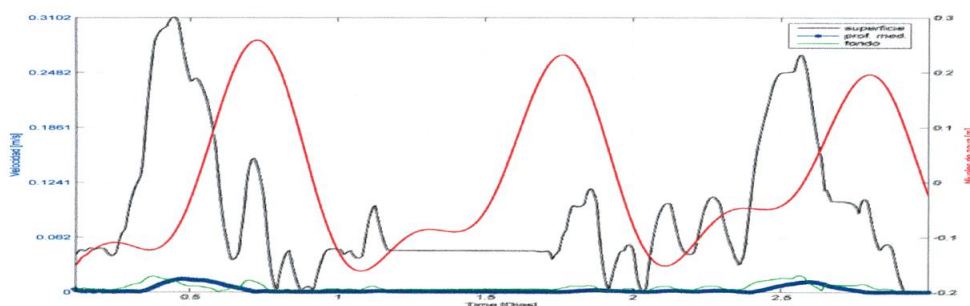


Figura 39. Resultados del modelo hidrodinámico para la corrida 24.

5.5. MODELO DE CALIDAD DE AGUA

La estratificación es un fenómeno importante para la dispersión de campo cercano en las descargas de emisarios submarinos como el existente en la ciudad de Santa Marta, las condiciones más deseadas son una estratificación de la densidad en la columna de agua en la cual la pluma de contaminación quede atrapada y no alcance la superficie.

Los resultados del modelo calidad de agua se analizaron según las graficas de salinidad – temperatura y los perfiles verticales de distribución de las mismas y su relación con la estratificación en la columna de agua en el sitio de vertimiento del emisario submarino, junto con graficas TS (temperatura vs salinidad) donde se integran todas las corridas.

En las figuras Figura 40 a Figura 63 se presentan los perfiles de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidad (%) y densidad (σ_t) para el sitio de descarga del emisario submarino, el cual se ubica en el nodo 323 de la malla usada para el presente estudio con coordenadas 984949.25, 1736527.2 en UTM este y norte. Los perfiles fueron interpolados y graficados a través del software Matlab 7.0, y varían entre 0 y 100 metros de profundidad, abarcando tres Kilómetros de longitud perpendiculares a la línea de costa.

La temperatura presentó una estratificación típica, disminuyendo con la profundidad como es esperado en la mayoría de los casos. Se presentaron valores máximos para abril y mayo con 27 y 28.5 $^{\circ}\text{C}$ en los picos máximos,

como se puede observar en las Figura 47 a Figura 50. En general se presento una tendencia a aumentar a lo largo del año, los valores mínimos se presentaron en los meses de enero (Figura 40, Figura 41 y Figura 42), junio (Figura 51), agosto (Figura 55 y Figura 56) y diciembre (Figura 63).

En cuanto a la salinidad se encontró que la mayor parte del año este factor aumenta con la profundidad, para algunas corridas se mantuvo constante, las cuales se ubicaron en febrero, marzo, abril, mayo y julio; solo en la simulación del 27 de febrero y la del 15 de junio se presento una variación inversa a la ya mencionada. Los valores máximos se presentaron en los primeros cuatro meses del año mientras que los valores mínimos se situaron en mayo y de agosto a diciembre (ver Figura 55 a Figura 63, sección media).

Según las densidades máximas y mínimas medidas para las fechas de simulación; se encontró que este parámetro aumenta con la profundidad para todas las corridas; la diferencia entre la densidad en la superficie y la densidad del agua en el fondo da una idea de la estratificación del área de descarga del emisario; se encontraron valores de dicha diferencia mayores para las corridas 9 a 12 y 16 a 24, es decir para los meses de abril, mayo, junio y de agosto a diciembre los cuales iban desde 1.5 a $2.75 \sigma_t$. En la primera parte del año (enero a marzo) se encontró una estratificación relativamente baja con valores de entre 0.75 y $1.485\sigma_t$.

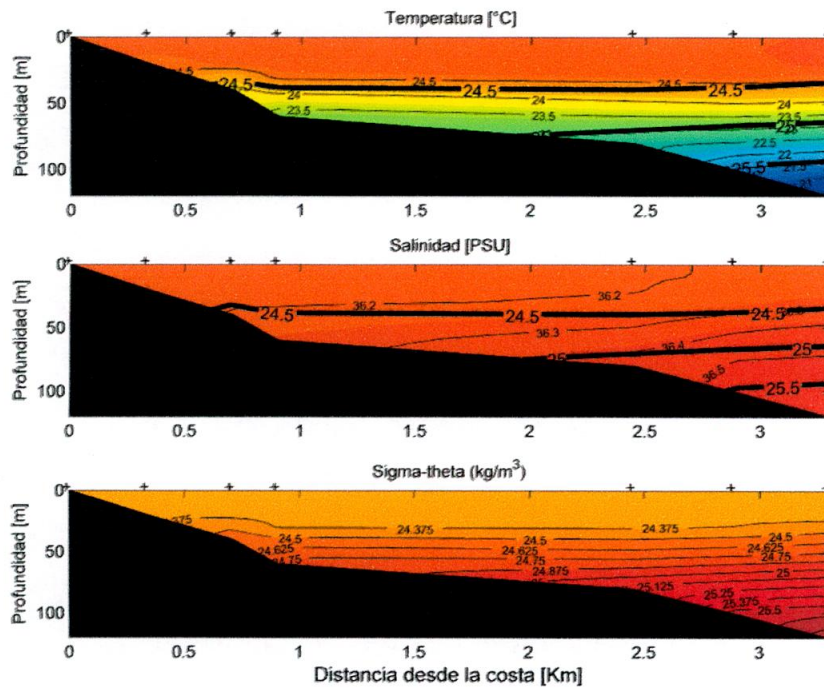


Figura 40. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 1.

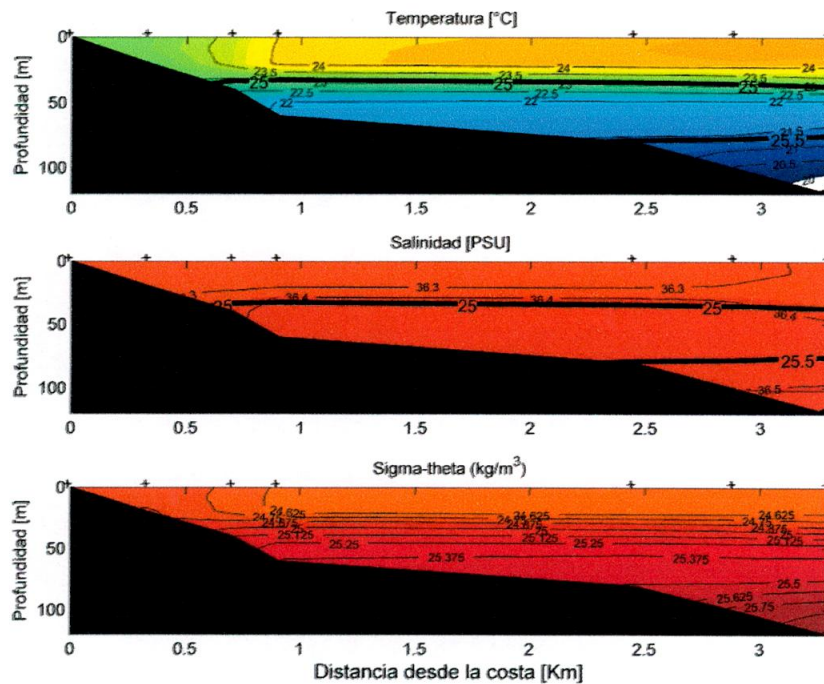


Figura 41. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 2.

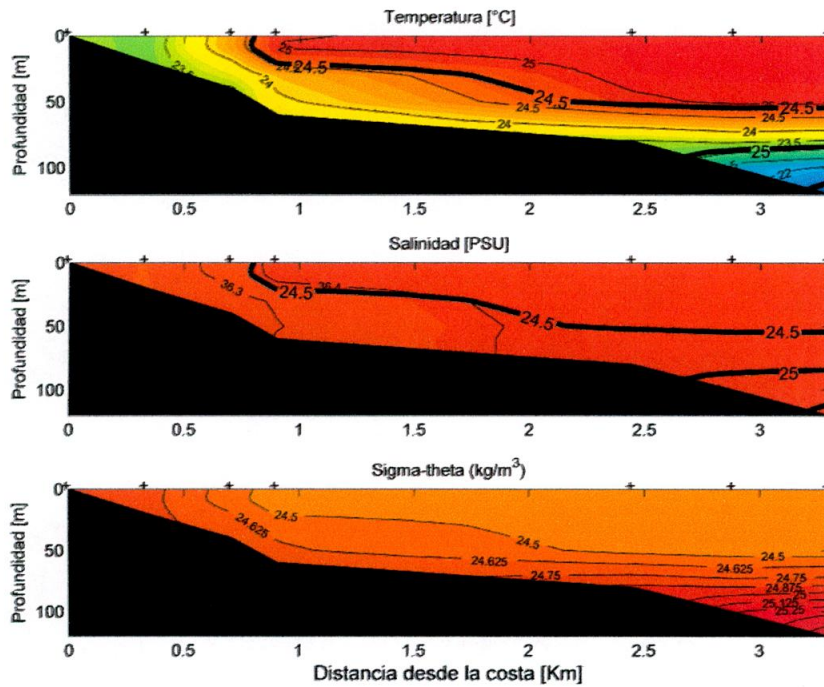


Figura 42. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 3.

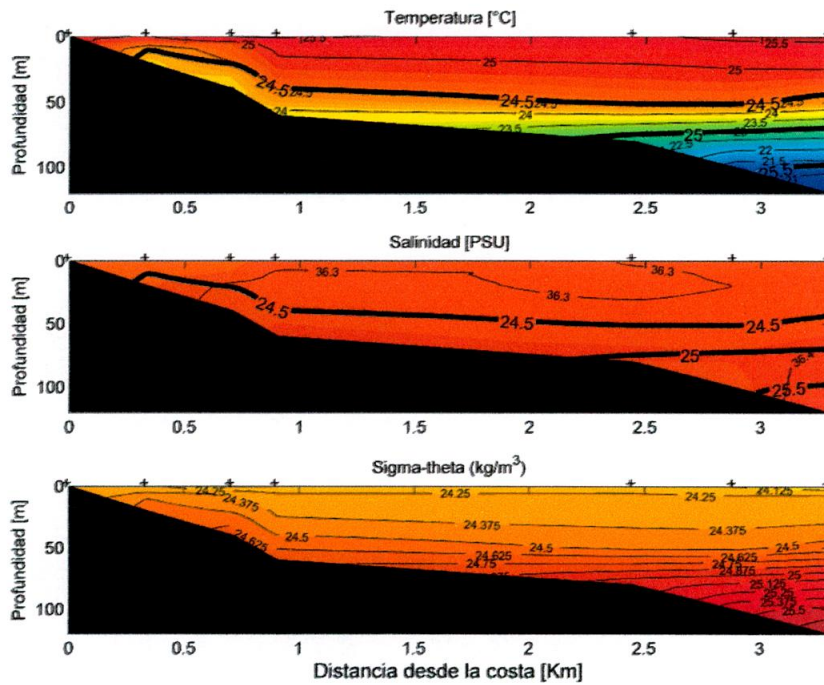


Figura 43. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 4.

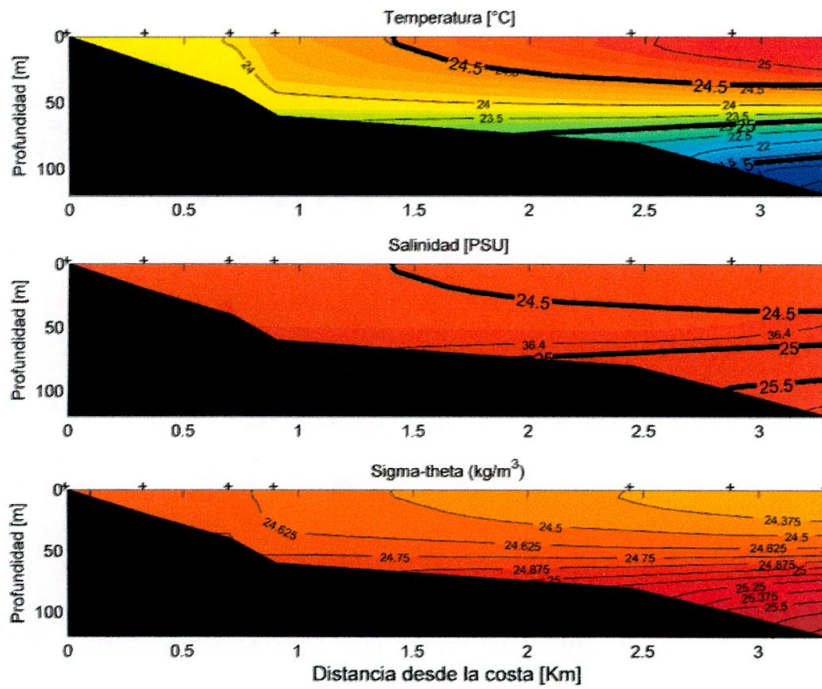


Figura 44. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 5.

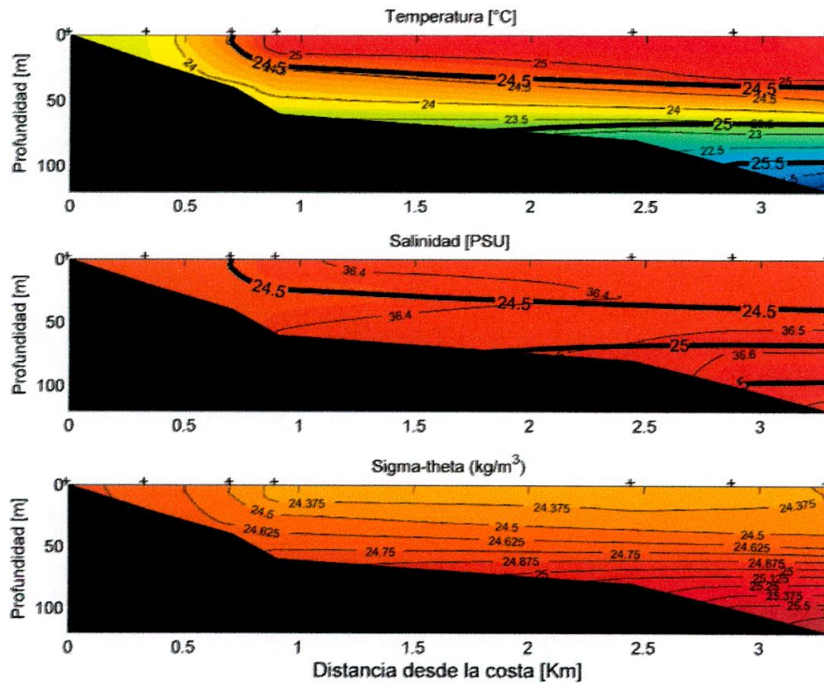


Figura 45. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 6.

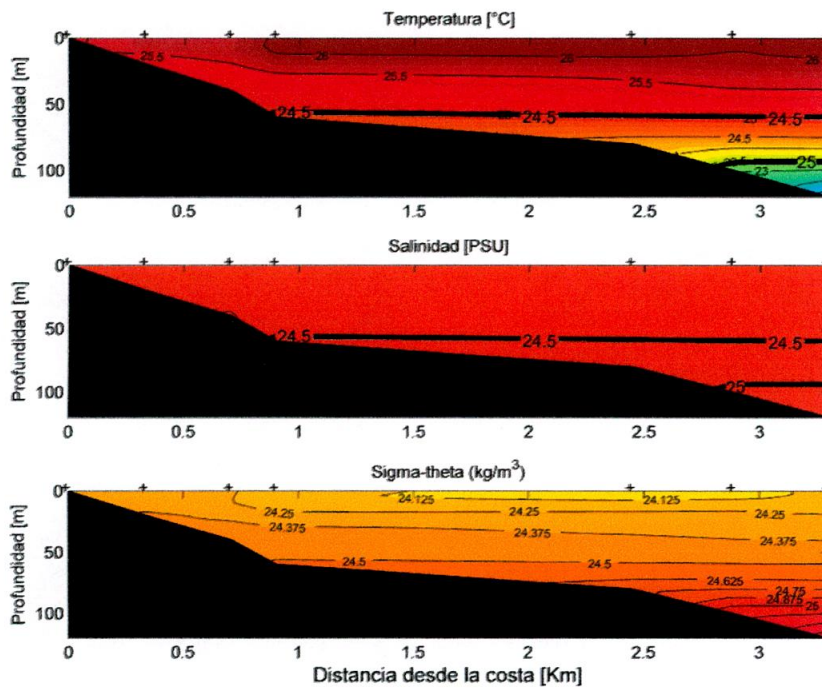


Figura 46. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 7.

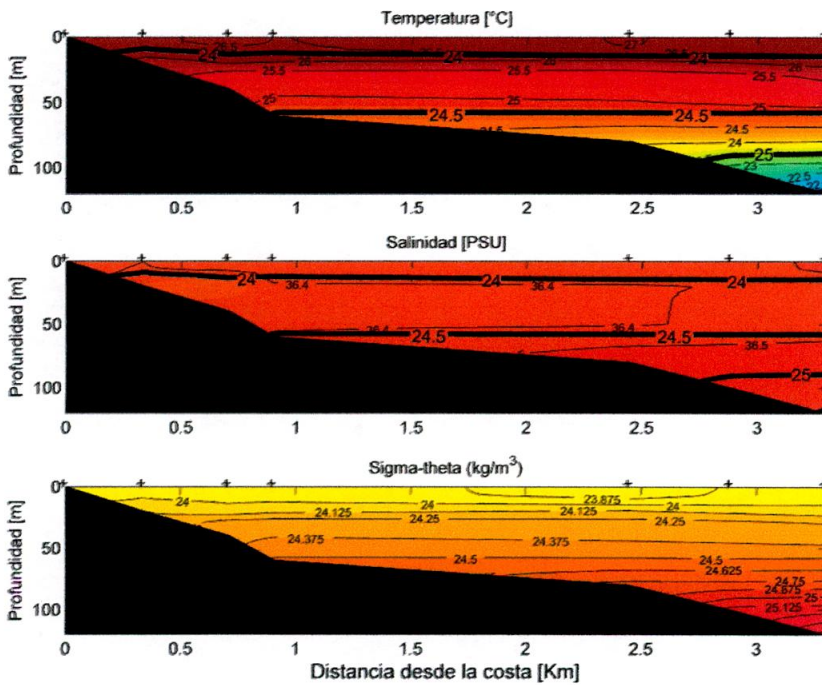


Figura 47. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 8.

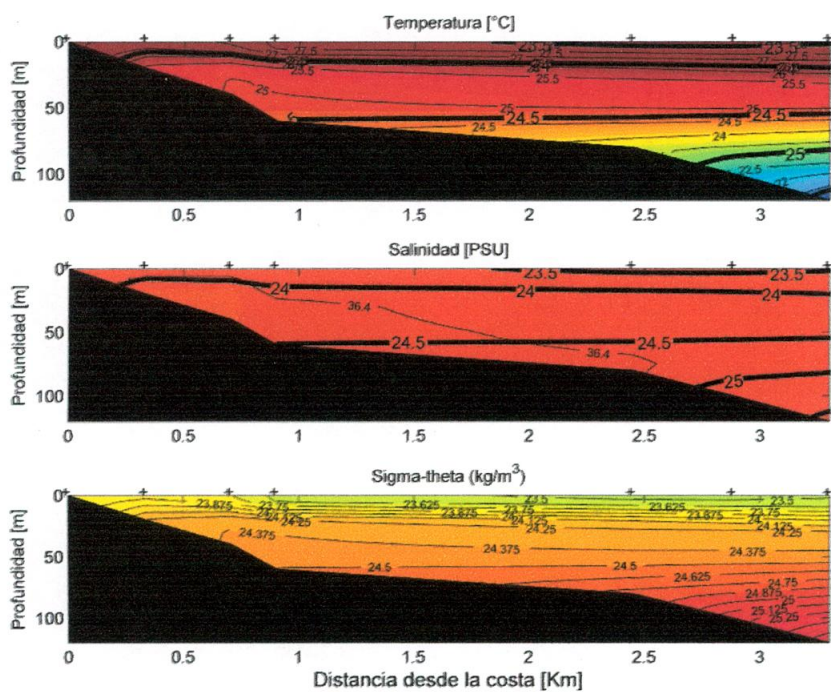


Figura 48. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 9.

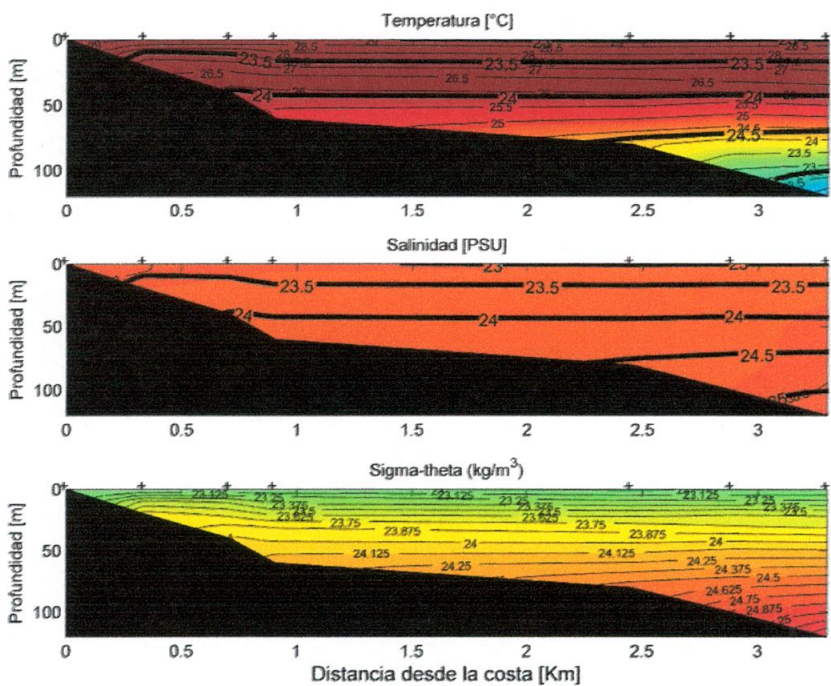


Figura 49. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 10.

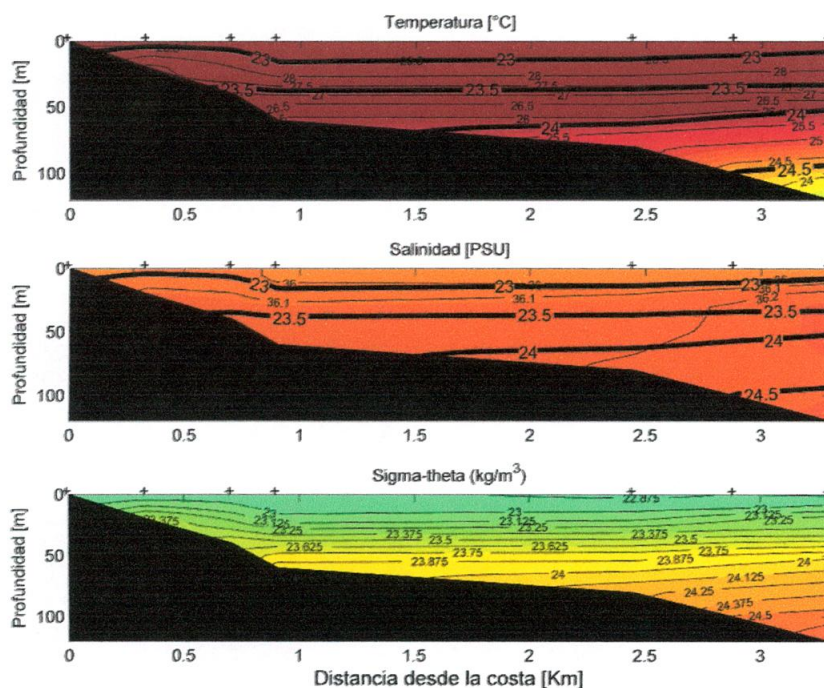


Figura 50. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 11.

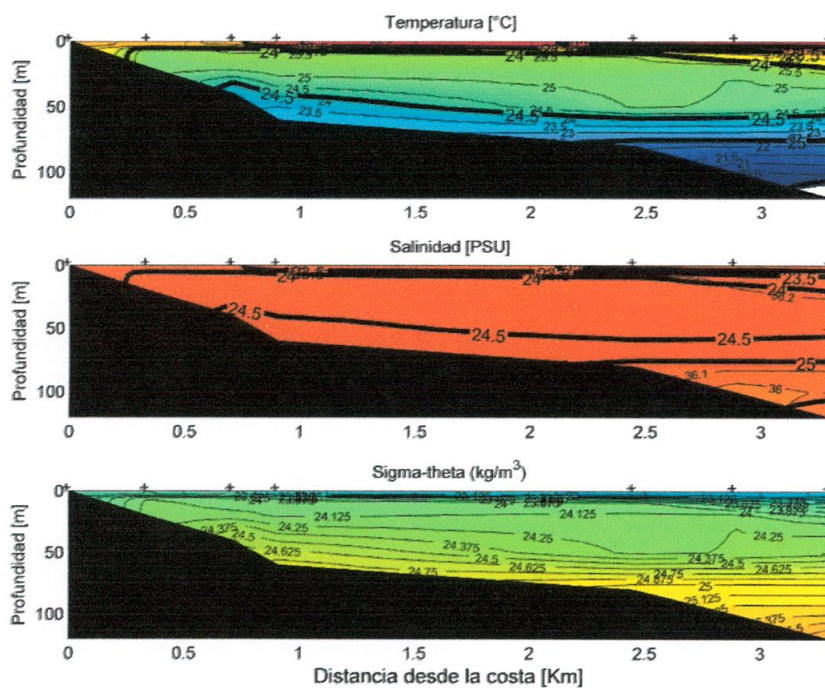


Figura 51. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 12.

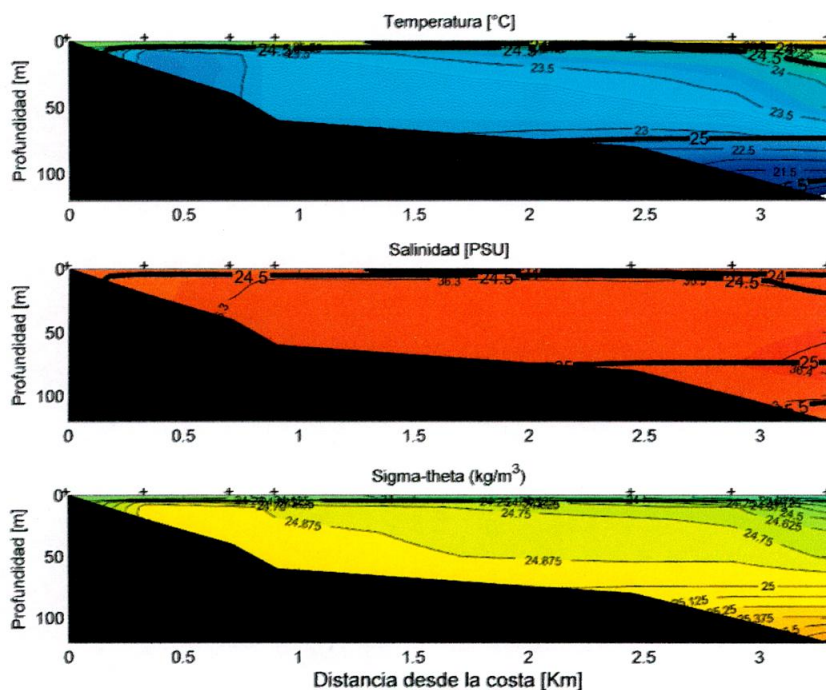


Figura 52. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 13.

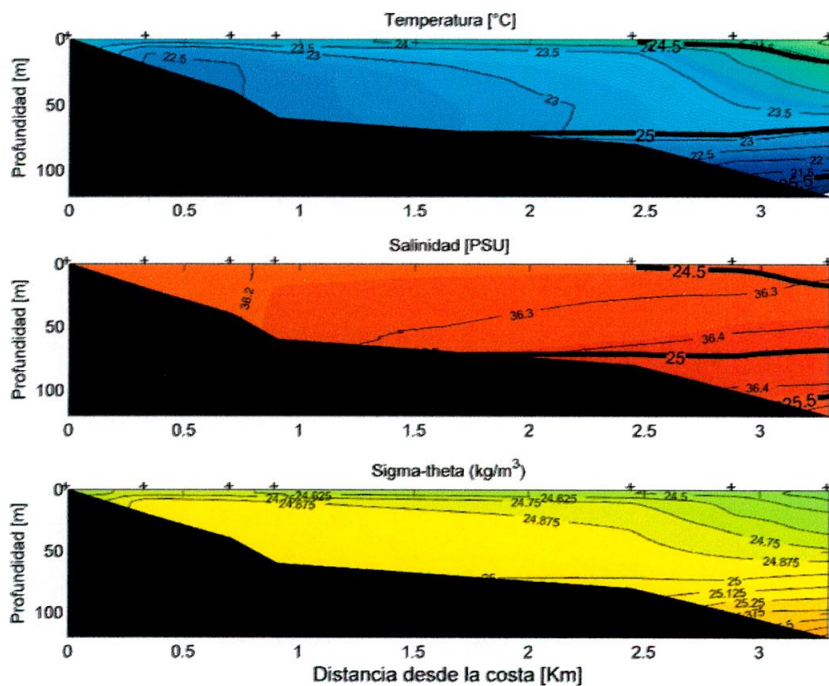


Figura 53. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 14.

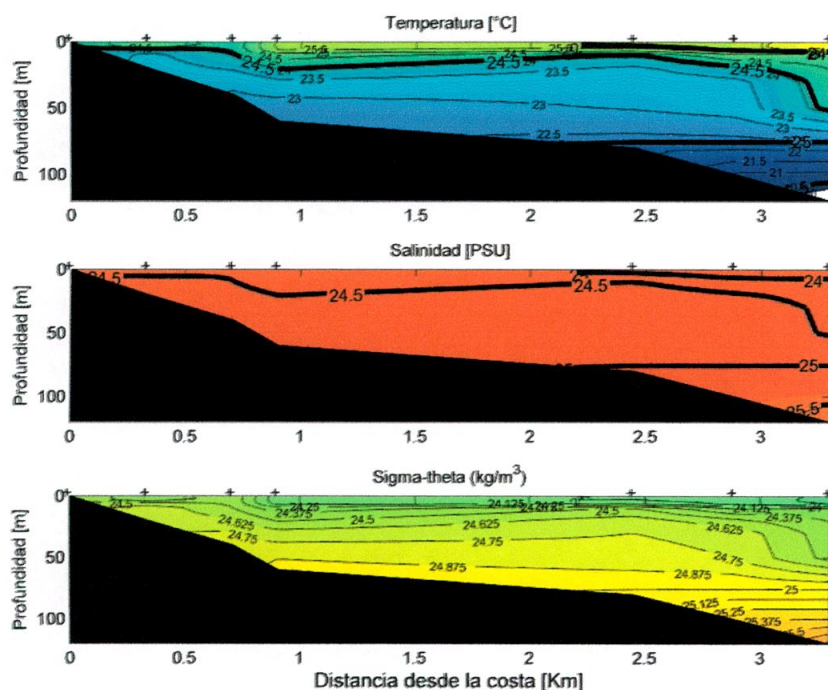


Figura 54. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 15.

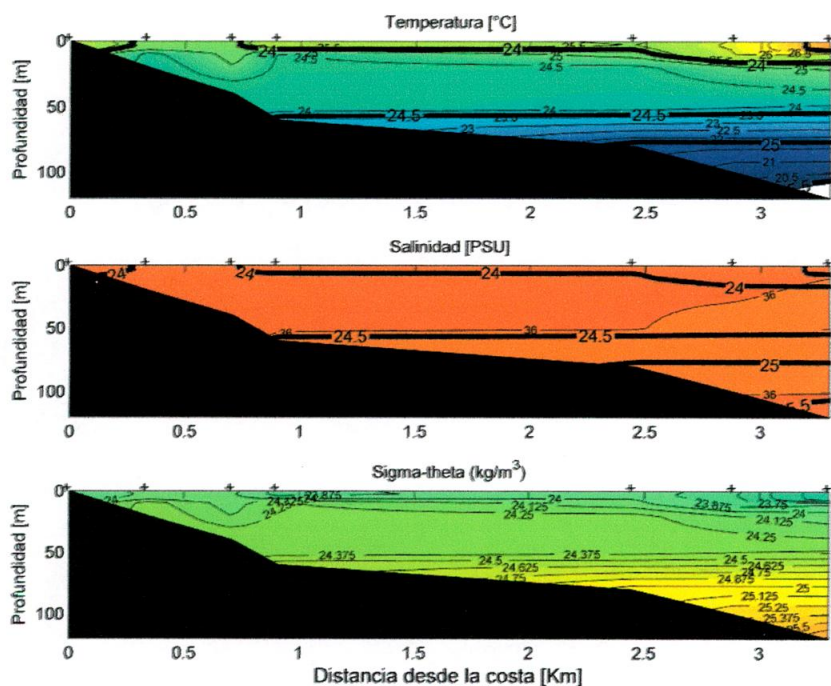


Figura 55. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 16.

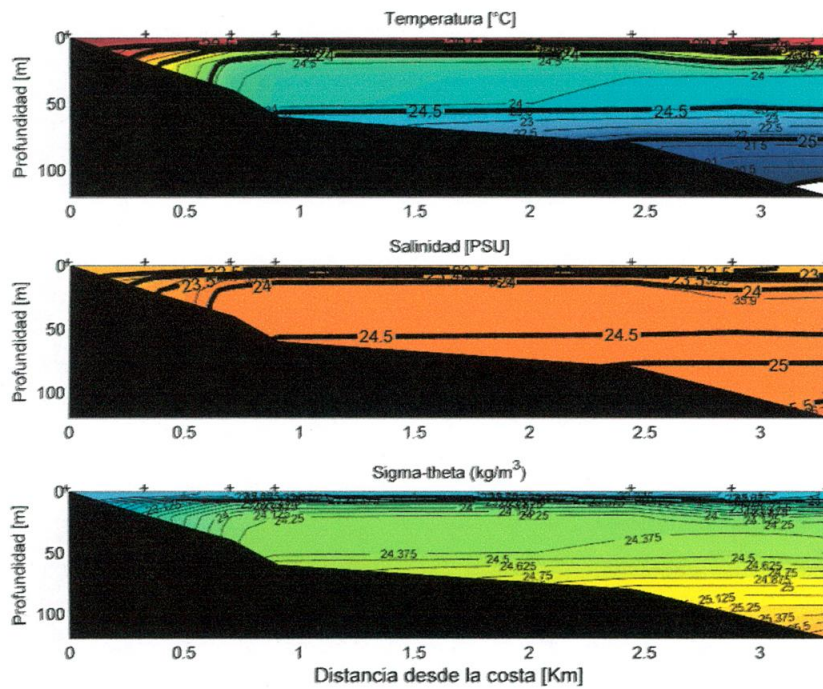


Figura 56. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 17.

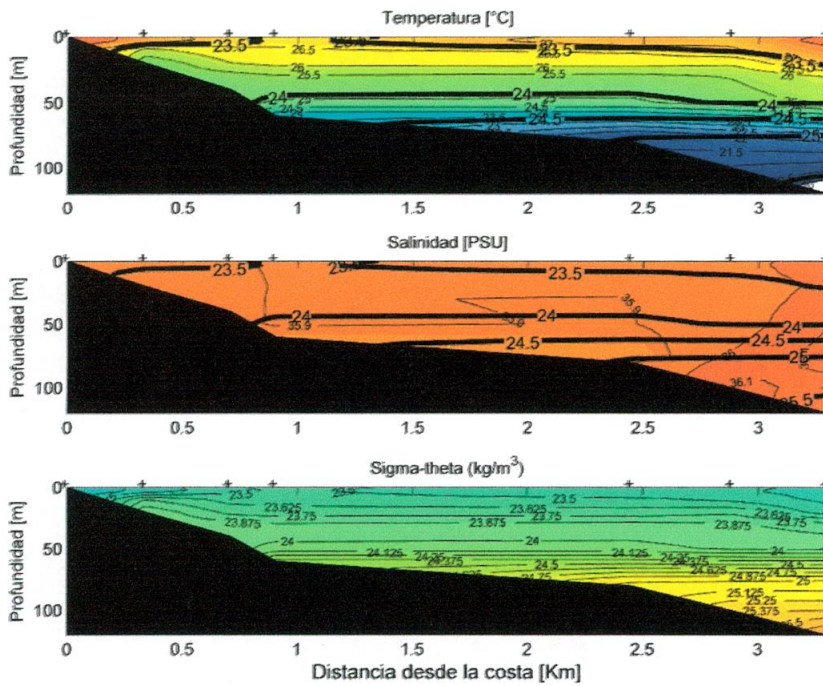


Figura 57. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 18.

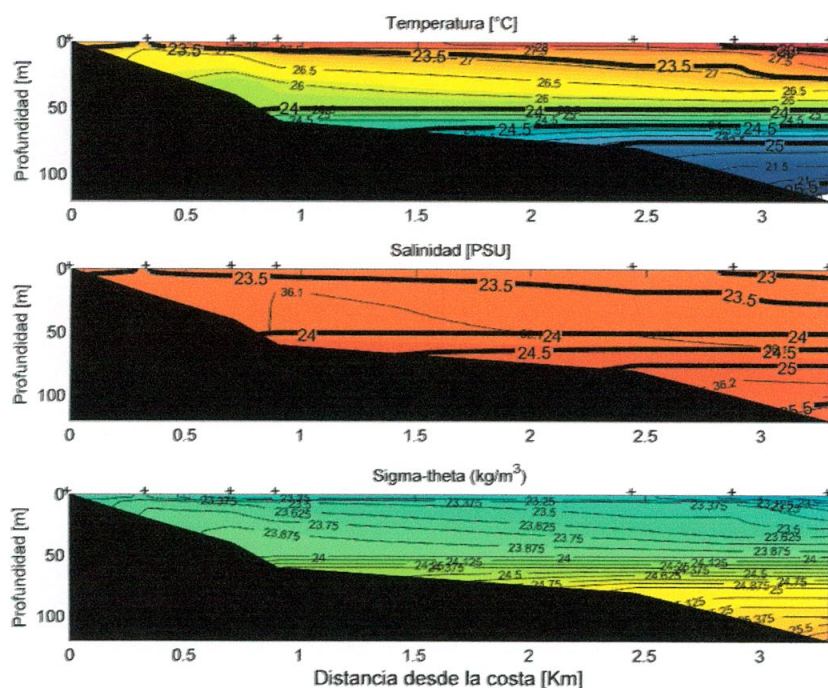


Figura 58. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 19.

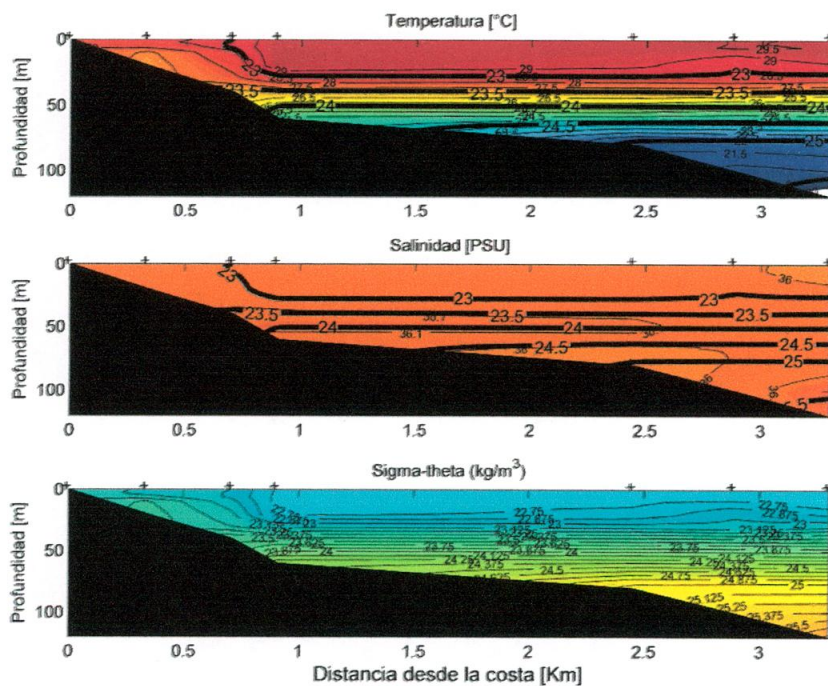


Figura 59. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 20.

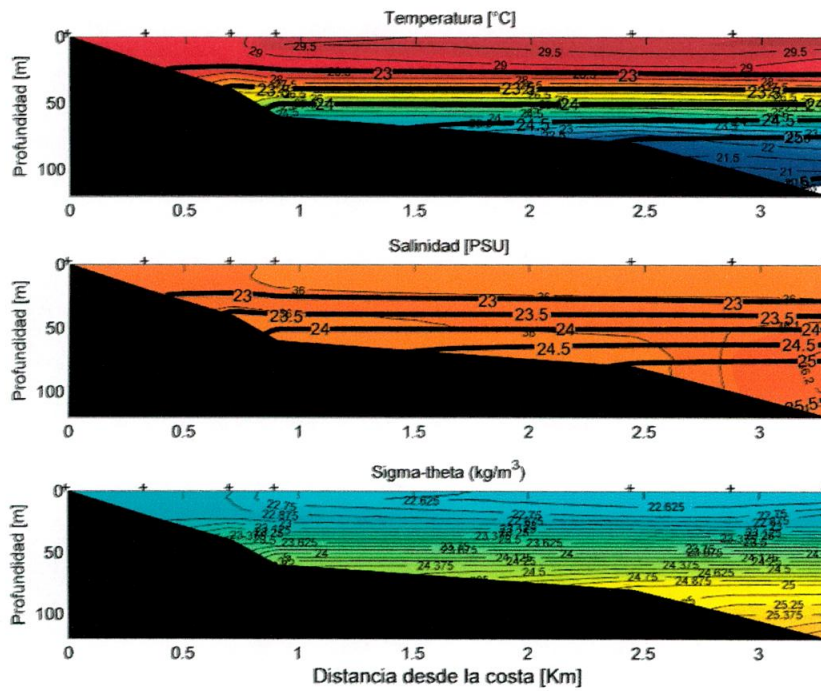


Figura 60. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 21.

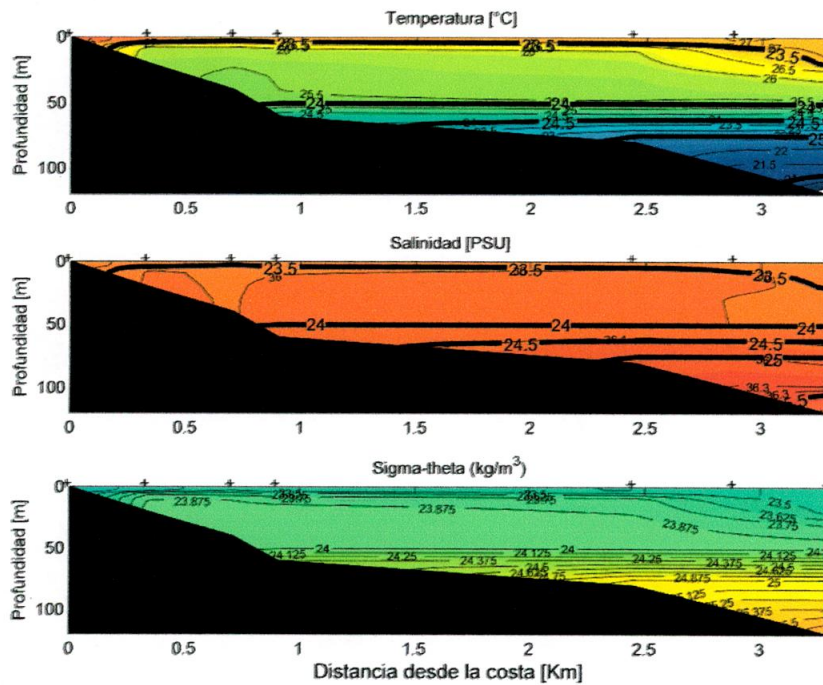


Figura 61. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 22.

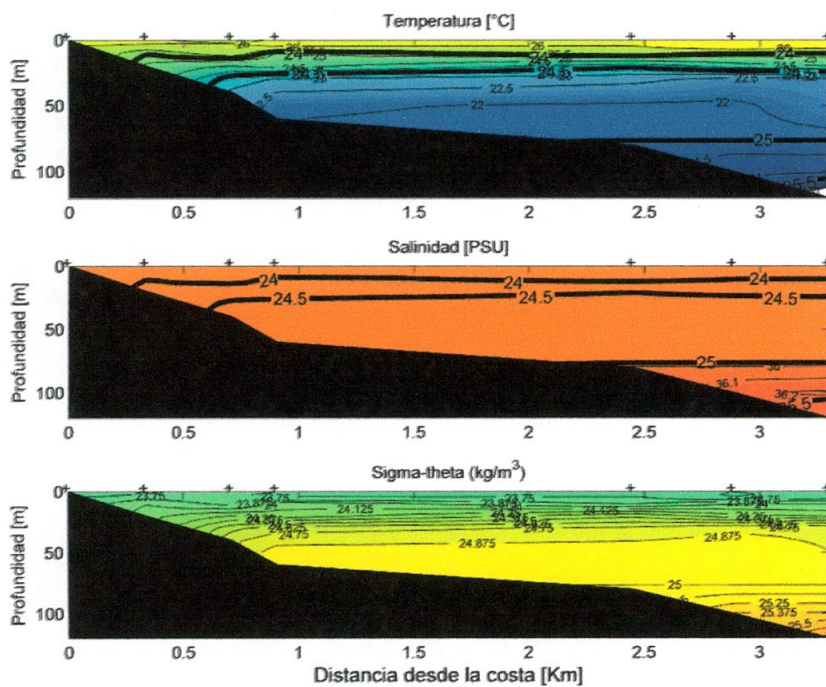


Figura 62. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 23.

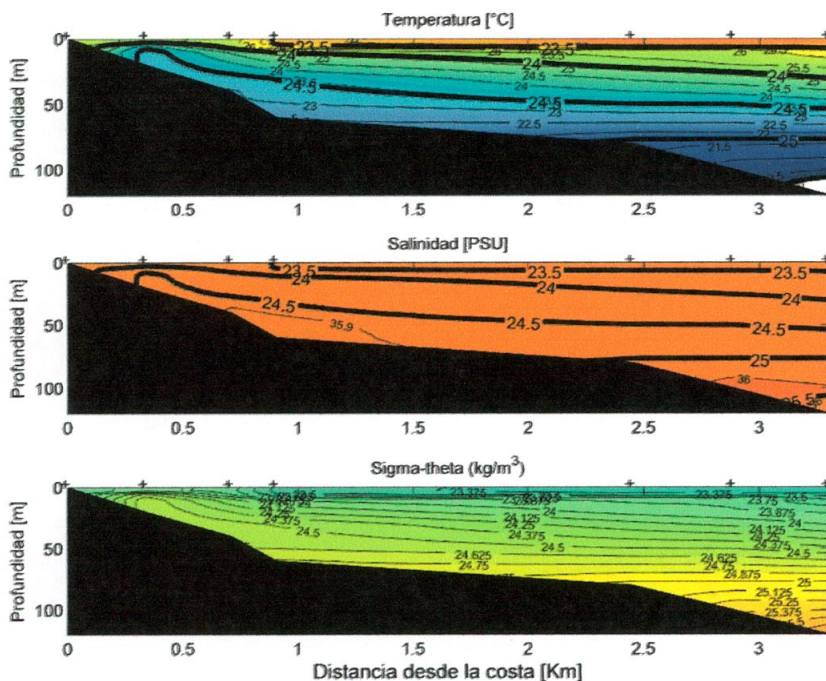


Figura 63. Perfiles de Temperatura, salinidad y densidad para la corrida 24.

En la Figura 64 se pueden observar los perfiles TS para todas las corridas del modelo de calidad de agua, de donde se interpreta la posible aparición de estratificación en las densidades, para las simulaciones que presentan una variación mayor a 2 Kg/m^3 en unidades de sigma t. para otras corridas por el contrario parece constante la temperatura y la salinidad, lo cual se ve representado por las líneas cortas y verticales en la grafica TS, para estos casos se presume que no hay una estratificación adecuada y esto se traduce en condiciones desfavorables para la dispersión de la pluma del emisario submarino, sin embargo el modelo de estratificación mostrará resultados más completos sobre el fenómeno de afloramiento de la pluma y su dilución.

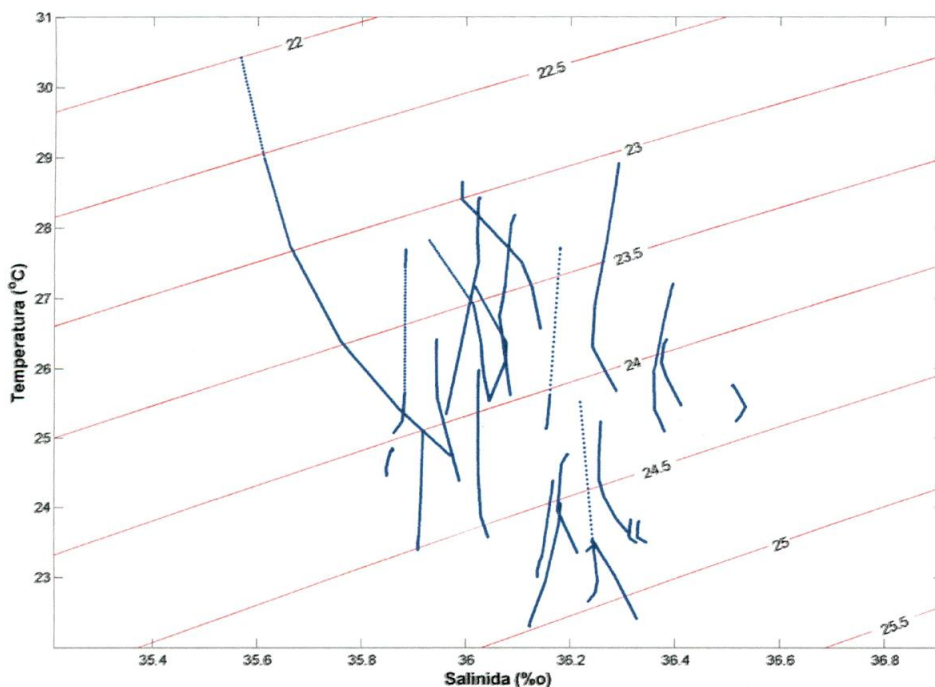


Figura 64. Gráficas TS para todas las simulaciones hidrodinámicas y de calidad del agua.

5.6. MODELO DE LAGRANGEANO DE TRANSPORTE DE PARTÍCULAS

El modelo Lagrangeano fue corrido para las 24 simulaciones hidrodinámicas y de calidad de agua, con el objetivo de determinar la influencia de la descarga del emisario submarino en el campo lejano; los resultados se muestran a través de isolíneas de excedencia del límite de coliformes totales permisible para aguas de contacto primario en Colombia, es decir la excedencia sobre 1000 NMP/100ml.

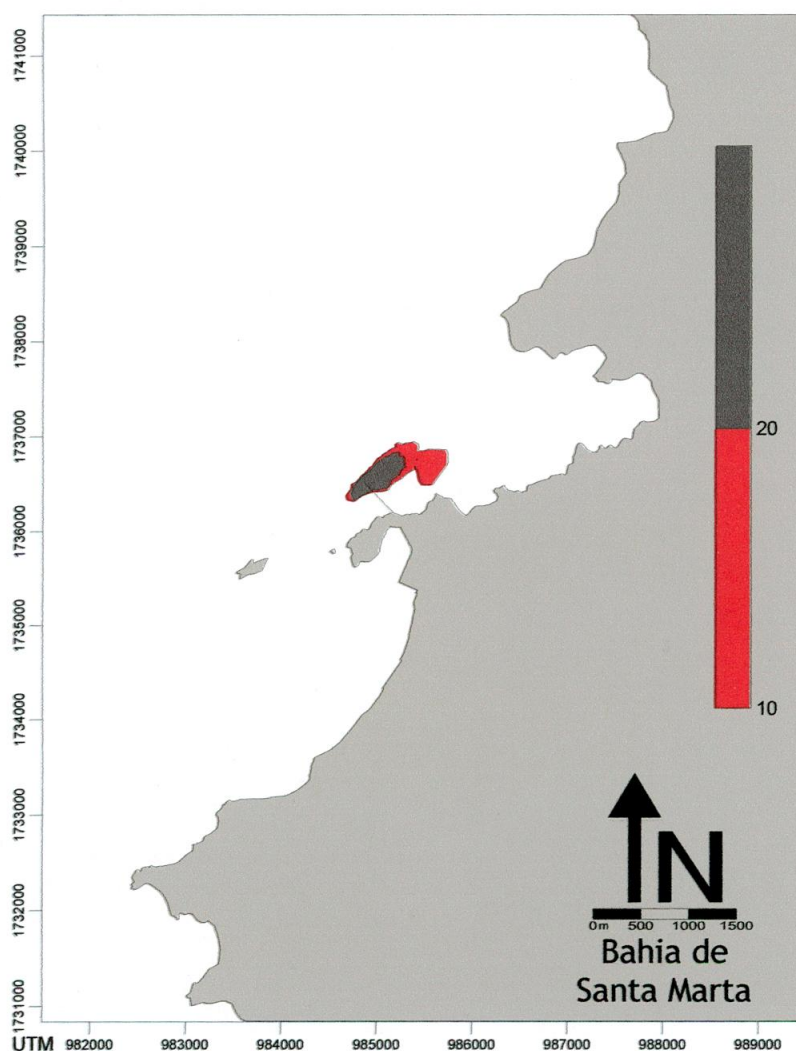


Figura 65. Grafico de excedencia para 1000 NMP/100ml general para todas las simulaciones.

En la Figura 65 se muestra la frecuencia con la cual es excedido el límite permisible de coliformes totales para aguas de contacto primario, computando todas las corridas del modelo Lagrangeano, es decir los resultados constituyen el promedio anual de la distribución de la pluma de contaminación. La frecuencia representa el porcentaje de tiempo que se excedió el límite mencionado.

Se puede observar una tendencia de la pluma a transportarse hacia el noreste; lo cual es consecuente con las simulaciones hidrodinámicas, ya que las direcciones predominantes de la corriente estuvieron ubicadas sobre un eje de 45° , predominando la dirección NE sobre las demás direcciones. En general las veinticuatro corridas presentaron comportamientos similares, se diferenciaron dos formas de distribución de la pluma de contaminación; la primera se presentó entre las corridas 1 y 9, es decir para los meses desde enero hasta abril, en estos casos se presentó un transporte asimétrico sobre el eje de 45° mencionado anteriormente, con preponderancia de excedencias hacia el Noreste de la pluma (ver Figura 66, Figura 67 y Figura 68a).

Para los meses comprendidos entre mayo y diciembre se presenta un comportamiento muy cerca a ser simétrico con pocas variaciones en la distribución de la pluma, exceptuando por el mes de octubre, donde se presentan los rangos más amplios de la excedencia del límite con frecuencia del 10% del tiempo, esto se puede observar con más detalle en la Figura 70d.

A pesar de que la pluma tuvo una distribución bastante extensa, esta no alcanzó la línea de costa en ninguna de las veinticuatro simulaciones. La distancia más cercana a la costa a la cual tocó la isolínea del 10% fue de 104 metros lineales, lo cual indica que en estas condiciones de funcionamiento del emisario submarino no se presentaría un fenómeno de contaminación de tal tipo.

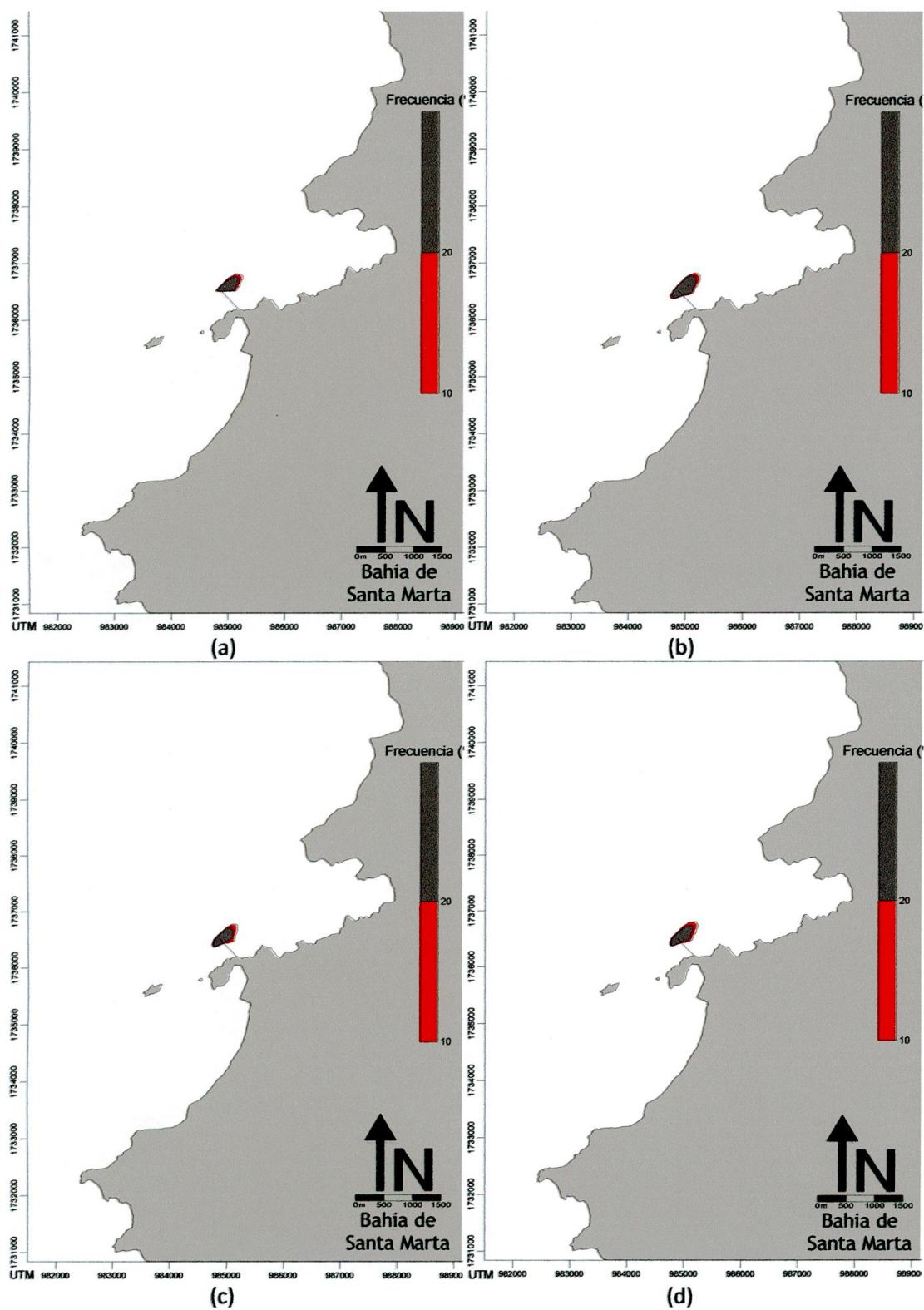


Figura 66. Gráficos de excedencia, simulaciones 1 (a), 2 (b), 3 (c) y 4 (d).

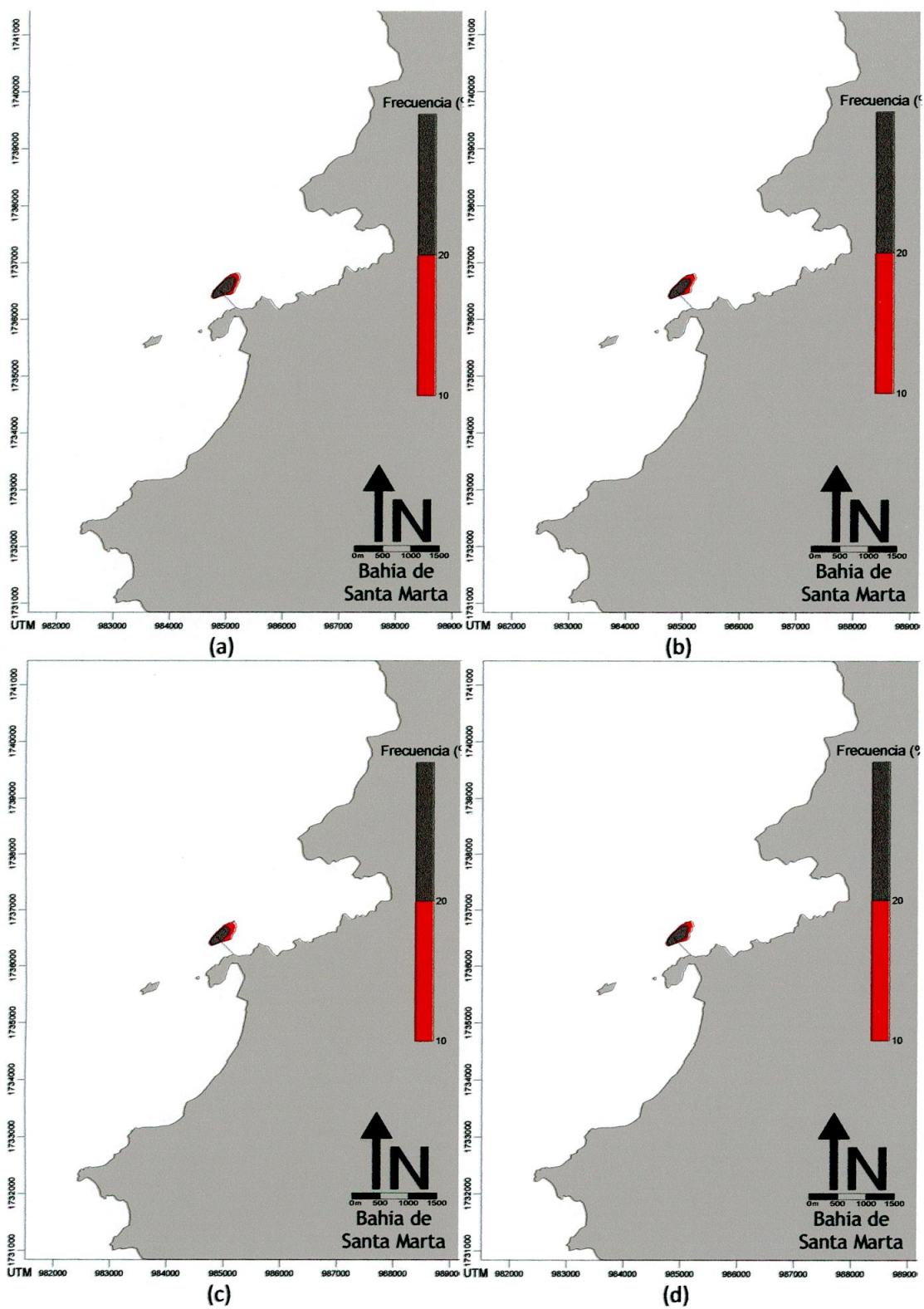


Figura 67. Gráficos de excedencia, simulaciones 5 (a), 6 (b), 7 (c) y 8 (d).

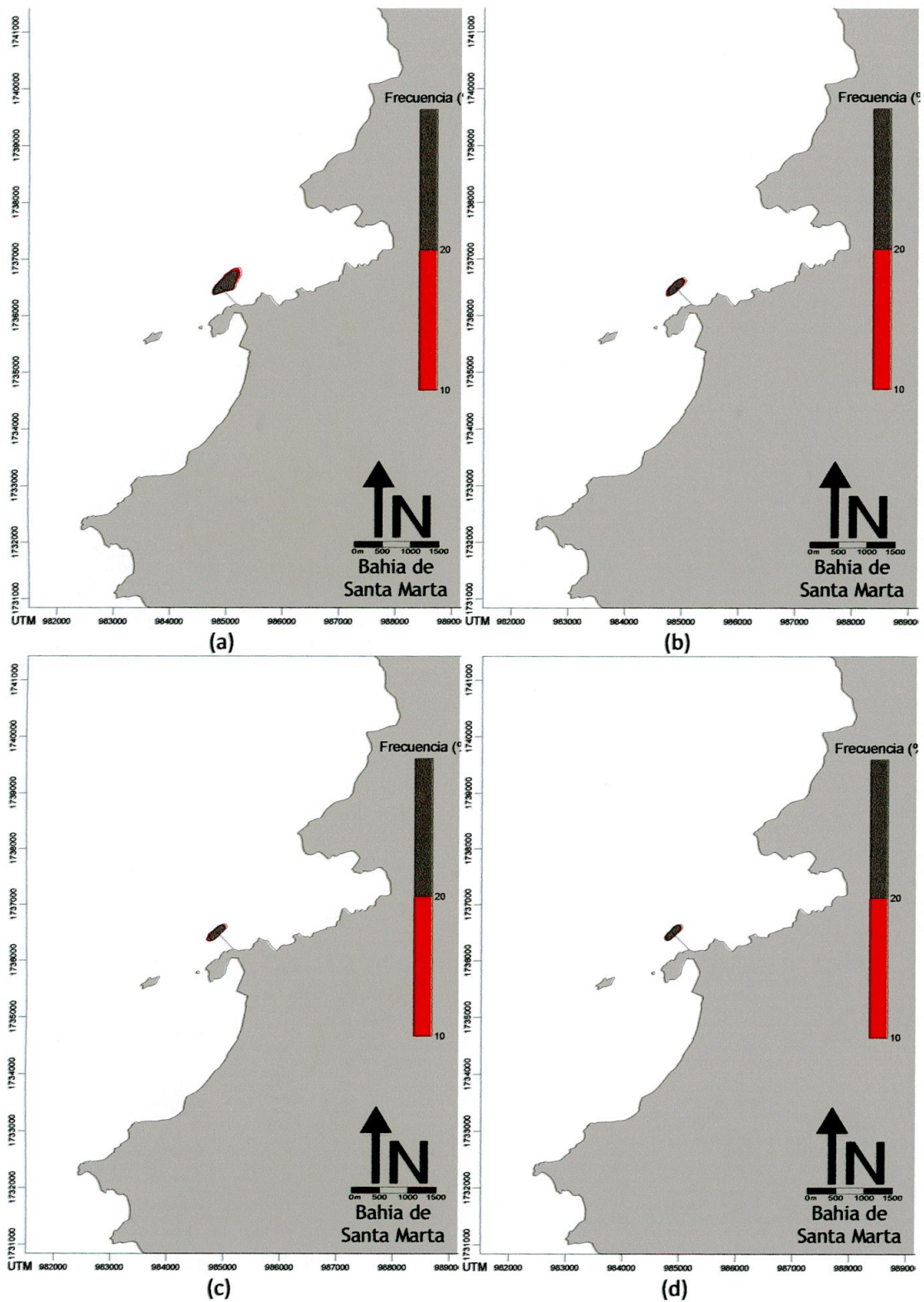


Figura 68. Gráficos de excedencia, simulaciones 9 (a), 10 (b), 11 (c) y 12 (d).

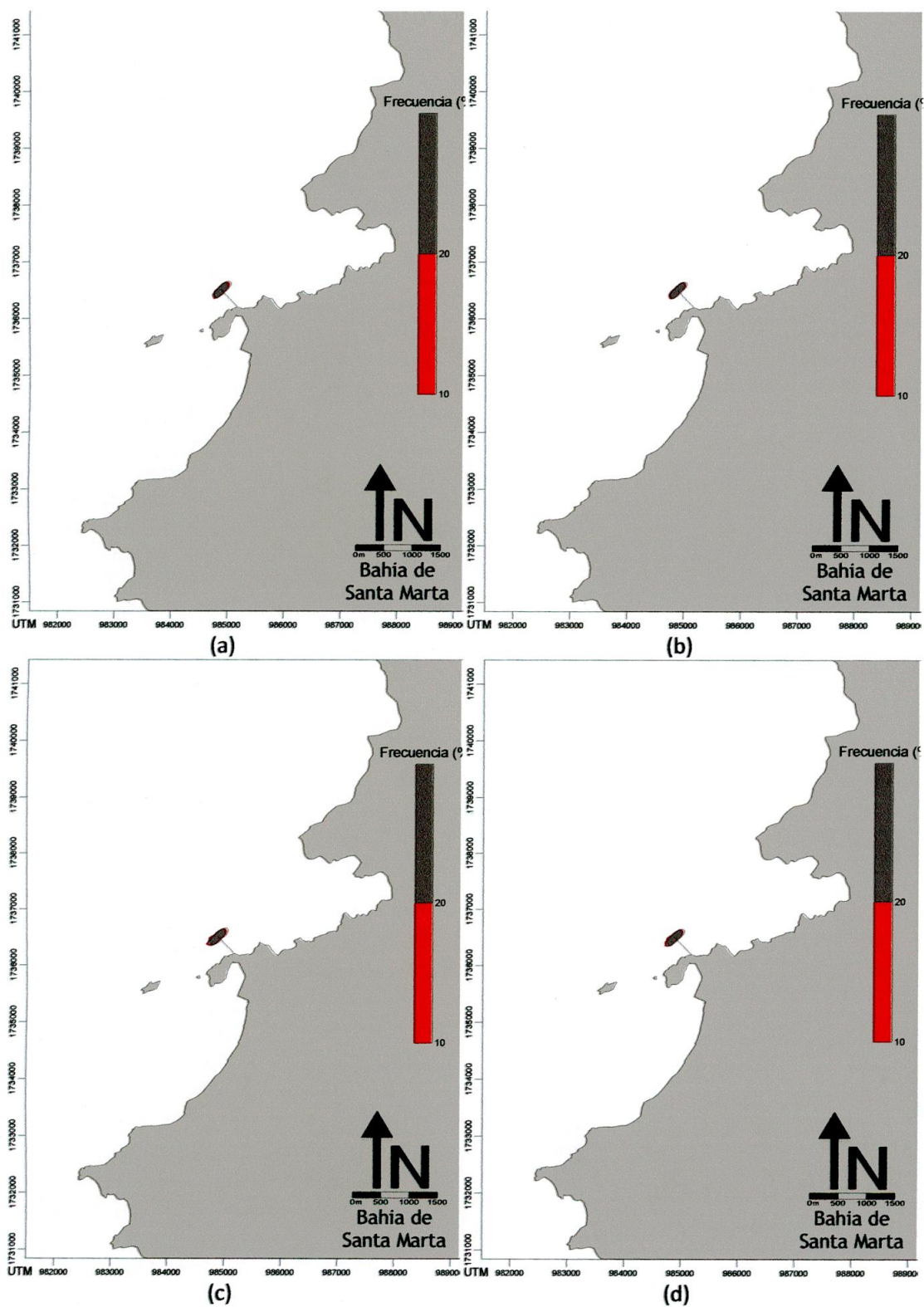


Figura 69. Gráficos de excedencia, simulaciones 13 (a), 14 (b), 15 (c) y 16 (d).

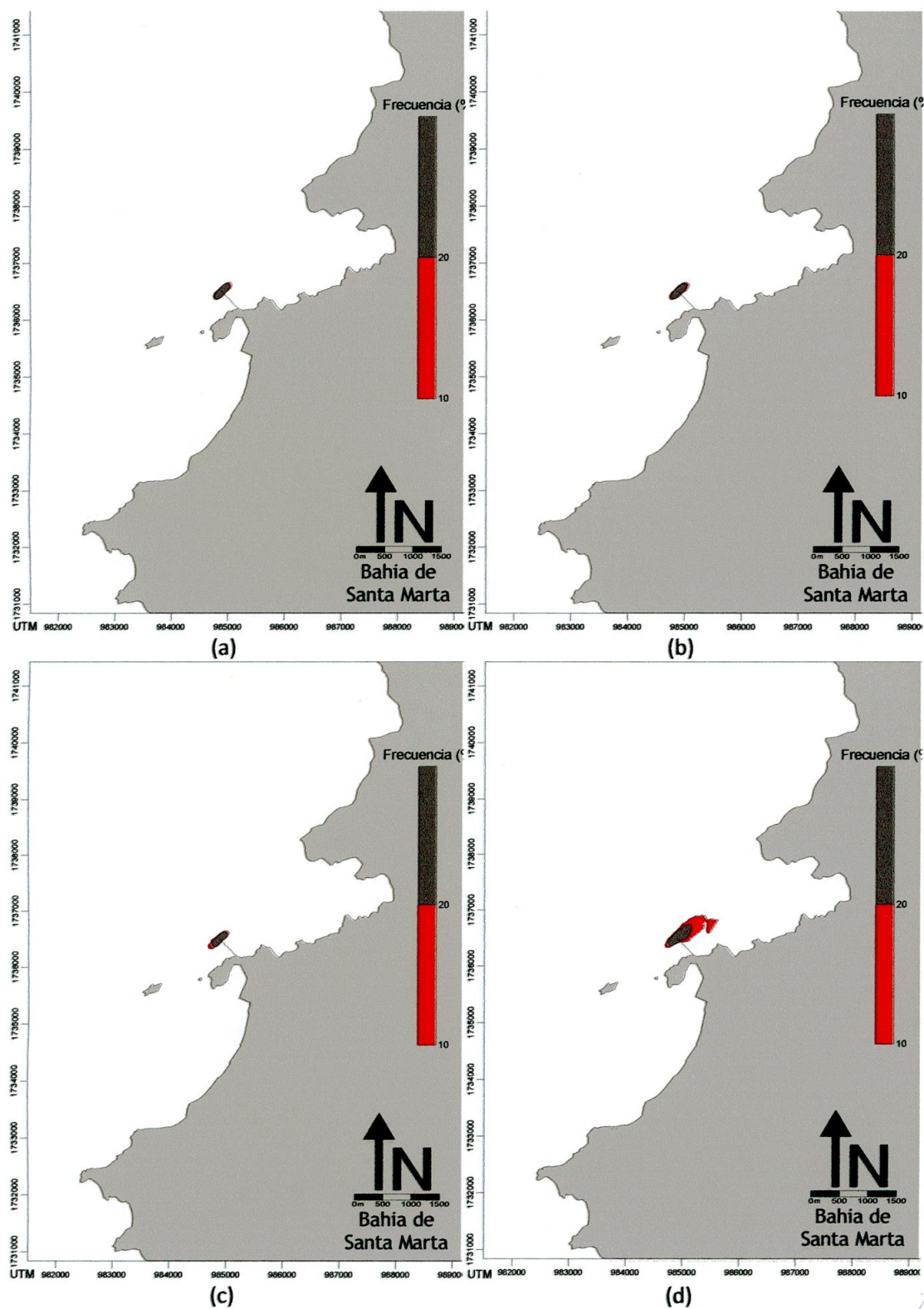


Figura 70. Gráficos de excedencia, simulaciones 17 (a), 18 (b), 19 (c) y 20 (d).

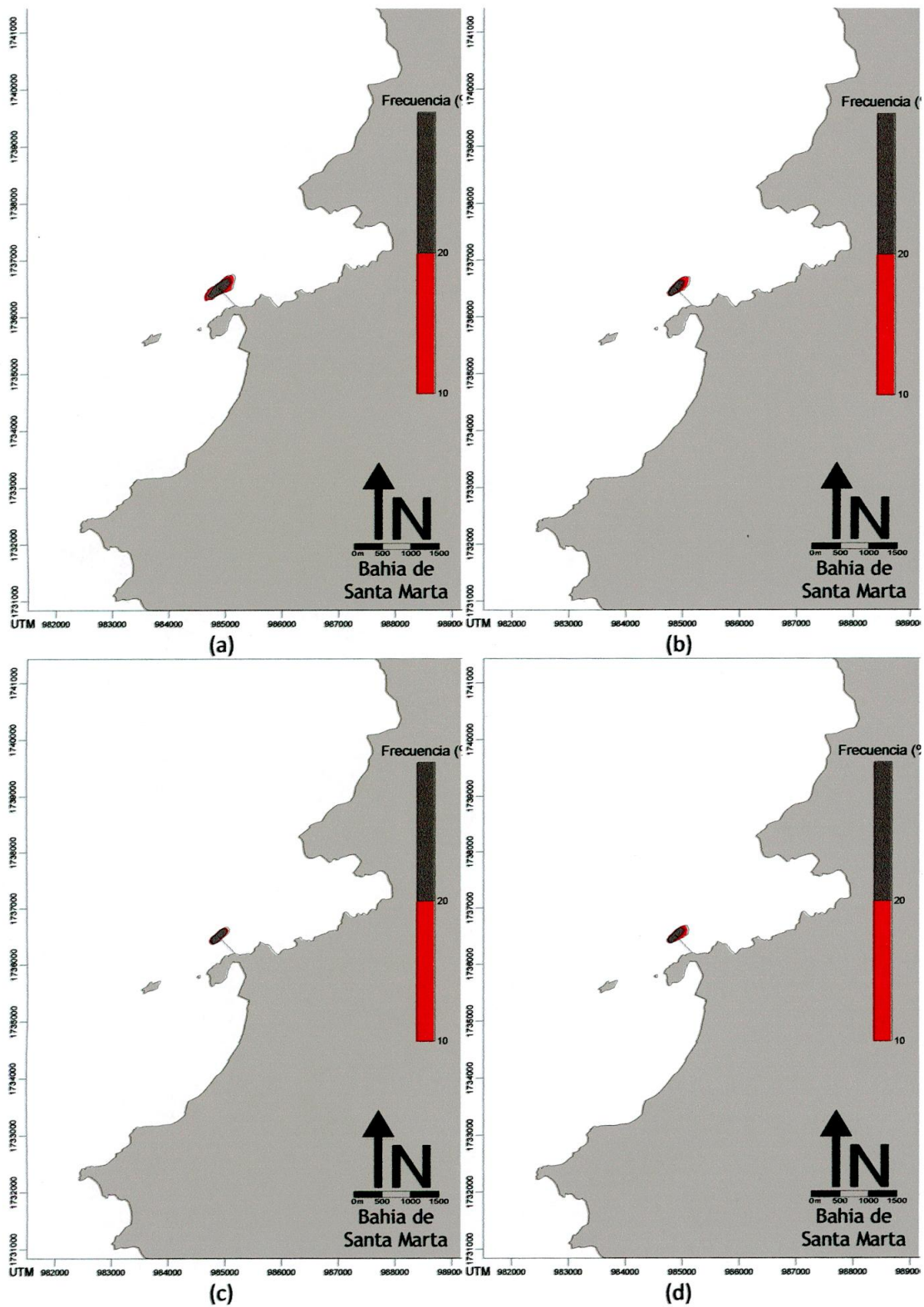


Figura 71. Gráficos de excedencia, simulaciones 21 (a), 22 (b), 23 (c) y 24 (d).

6. CONCLUSIONES

El modelo hidrodinámico calibrado para el presente estudio, demostró un ajuste adecuado para la modelación de los parámetros oceánicos principales de la Bahía de Santa Marta, la salinidad y la temperatura simuladas demostraron un ajuste adecuado para la representación del comportamiento de estos dos parámetros, encontrado mediante el análisis de datos históricos de los monitoreos realizados en el área de estudio.

El modelo Lagrangeano aplicado para la modelación de la pluma del emisario submarino existente en la BSM, demostró que el transporte de campo lejano hace que la pluma sea arrastrada hacia el noreste con distancias hasta de 300 metros y excediendo en términos de frecuencia el 10% de las veces, el límite permisible de 1000 NMP/100 ml para coniformes totales.

Se encontró presencia de estratificación en la mayor parte del año para la densidad en la columna de agua para el sitio específico de vertimiento del emisario submarino, lo cual indica que la pluma de contaminación no alcanza la superficie del agua la mayor parte del tiempo, sin embargo el modelo de dilución en campo cercano demostró que en algunas ocasiones se excede el límite permisible para la dilución deseada de la pluma de contaminación.

En general se puede concluir que el modelo hidrodinámico aplicado en este caso de estudio presento un comportamiento satisfactorio y puede representar las condiciones de cuerpos de aguas similares, los modelos de calidad de agua y de transporte de partículas de enfoque Lagrangeano pueden ser aplicados para bahías profundas y relativamente chicas como la BSM

7. BIBLIOGRAFÍA

Abdennadher J., Boukthir M. 2006. Numerical simulation of the barotropic tides in the Tunisian shelf and the strait of sicily. *Journal of Marine Systems*. 63: pág 181, 162.

Al-Rabeh, A.H., Lardner, R.W., Gunay, N. 1998., *Gulfhdyro Version 2.0 A software package for hydrodynamics in the Arabian Gulf*. *Environmental Modelling & Software*. 15: pág 23.

Altamar, J.C., Coley, C.P. 2007. Simulación hidrodinámica y de calidad del agua en el área de influencia de las descargas del río Manzanares en la bahía de Santa Marta. Tesis de grado de ingeniería ambiental. Universidad del Magdalena.

Bâki Iz, H., 2006. How do unmodeled systematic mean sea level variations affect long-term sea level trend estimates from tide gauge data?. *J Geod*. 80: pág 48.

Corral, M., Pozzi, C., Plencovich, G., Hillman, G., Pagot, M., Rodríguez, A, 2005. Modelación hidrodinámica con apoyo satelital de la circulación en la laguna mar chiquita. *MECOM 2005 – VIII congreso argentino de mecánica computacional*.

Correa, D., Gonzáles, E., Alvarado, V., 2005. Modelamiento del flujo de mareas en la bahía de Paita. pág 31.

Crespo, A.J.C., Gómez-Gesteira, M., Dalrymple, R.A. 2003. Hybridation of generation propagation models and SPH model to study severe sea states in Galician Coast. *Journal of Marine Systems*. 72: pág 135.

Egbert, G.D., Bennett, A. F. and Foreman, M.G.G. (1994). TOPEX/POSEIDON Tides Estimated Using a Global Inverse Model, *J. Geophys. Res.*, 99, 24821-24852.

Field, D., D.2000. Qualitative measures for initial meshes. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 4: pág 887 – 906.

Fossati, M., Piedra-Cueva, I. 2007. Numerical modelling of residual flow and salinity in the Rio de la Plata. *Applied Mathematical Modelling*. 32: pág 1068.

García, F., Palacio, C., García, U., 2009. Generación de mallas no estructuradas para la implementación de modelos numéricos. *DYNA*. 157: pág 887 – 906.

Hanerta, E., Le Rouxc, D., Legatb, V., Deleersnijdera, E., 2005. An efficient eulerian finite element method for the shallow wáter equations. *Ocean Modelling*. 10: pág 115 – 136.

Iguaran, C.E., Granados, M. 2007. Modelo numérico tres dimensional para la simulación del transporte y dispersión de “derrames de hidrocarburos” en la zona costera de Santa Marta. Tesis de grado de ingeniería ambiental. Universidad del Magdalena. pág 50, 52, 53, 54.

INVEMAR. 1990. Estudio ecológico integrado de la zona costera de Santa Marta y el parque nacional Tayrona. Informe final. Programas ecosistemas marinos. Santa Marta.

Osorio, D.J., Pardo, R.J. 2007. Simulación de la dilución inicial de los vertimientos del emisario submarino de la ciudad de Santa Marta, con el modelo Visual Plumes. Tesis de grado de ingeniería ambiental. Universidad del Magdalena.

Pairaud, I.L., Lyard, F., Auclair, F., Letellier, T., Marsaleix, P. 2008. Dynamics of the semi-diurnal and quarter-diurnal internal tides in the Bay of Biscay. Part 1: Barotropic tides. *continental shelf research*. 28: pág 1294.

Person, P. O., Strang, G., 2004. A simple mesh generator in MATLAB. *SIAM Review*,. 46 (2): pág 329 – 345.

Rodríguez, L.A., Barros, R.M. 2007. Simulación hidrodinámica y de calidad del agua en el área de influencia de las descargas del emisario submarino en la bahía de Santa Marta. Tesis de grado de ingeniería ambiental. Universidad del Magdalena.

Roberts, Philip, J. W., 2003. Dilution Modeling for the Cartagena Ocean Outfall, Aguas de Cartagena. pág 59 - 84

Saint-Cast, F. 2008. Multiple time-scale modelling of the circulation in Torres Strait-Australia. continental shelf research. in press: pág 25, 26.

Schwiderski, E.W., (1980). On charting global ocean tides. Reviews of Geophysics and Space Physics 18, 243–268.

Sincock A. M., Wheeler S. y Whitehead G. (2003). Calibration and sensitivity analysis of a river water quality model under unsteady flow conditions. Journal of Hydrology 277 pp. 214–229.

Vaz, N., Dias, J.M., Leitao, P.Ch. 2007. Three-dimensional modelling of a tidal channel: the Espinheiro channel (Portugal). Continental shelf research. In press: pág 1.

Yang, Z., Hamrick, J., 2005. Optimal control of salinity boundary condition in tidal model using a variational inverse method. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 62: pág 13 – 24.

Zahran, K.H., Jentzsch, G., Seeber, G. 2006. Accuracy assessment of ocean tide loading computations for precise geodetic observations. Journal of Geodynamics. 42: 159–174. pág 159.

Zaron E.D., Egbert G.D. 2007. The impact of the M2 internal tide on data-assimilative model estimates of the surface tide. ocean modelling. 18: pág 210.