

**PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE DIFERENTES MEDIDAS
ESTRUCTURALES PARA REDUCIR LAS TASAS DE SEDIMENTACIÓN EN
EL CANAL DE ACCESO Y LAS ZONAS DE APROXIMACIÓN A LOS
TERMINALES MARÍTIMOS EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA**

YONNATHAN BURBANO CUERO

Proyecto de grado presentado como requisito parcial
Para optar al título de Ingeniero Civil



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA,
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI
2017

**PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE DIFERENTES MEDIDAS
ESTRUCTURALES PARA REDUCIR LAS TASAS DE SEDIMENTACIÓN EN
EL CANAL DE ACCESO Y LAS ZONAS DE APROXIMACIÓN A LOS
TERMINALES MARÍTIMOS EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA**

YONNATHAN BURBANO CUERO

Director:
Mg. JOSÉ LUIS GARCÍA VÉLEZ
Ingeniero Civil

Codirector:
Mg. CARLOS ALBERTO RAMÍREZ CALLEJAS
Ingeniero Civil



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA,
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI
2017

RESUMEN

En la Bahía de Buenaventura se localizan varios terminales marítimos, a través de los cuales se moviliza más del 42% de la carga de importación y exportación de Colombia, desempeñando un papel protagónico en la apertura económica del país. Sin embargo, la bahía presenta unos procesos sedimentológicos que afectan la accesibilidad a los terminales marítimos, debido a la fuerte sedimentación en dichos sectores lo cual obliga a realizar frecuentes y costosos dragados de mantenimiento.

En el presente estudio se plantearon y evaluaron mediante la modelación matemática diferentes medidas estructurales con el propósito de disminuir las tasas de sedimentación en los sectores de aproximación a los terminales marítimos existentes actualmente en Buenaventura. Inicialmente, se realizó la caracterización física de la Bahía sobre aspectos hidrometereológicos, fluviales, oceánicos y geomorfológicos, de los cuales se determinó la importancia de los ríos Dagua y Anchicayá en el transporte de sedimentos en suspensión y las tasas de sedimentación en los terminales marítimos; la información fue obtenida de entidades como el IDEAM, Universidad del Valle, INVEMAR, DIMAR, CVC, etc. Se implementó el modelo matemático hidrodinámico y sedimentológico MOHID con el fin de simular los proceso de sedimentación en la bahía. Se plantearon y simularon 5 alternativas estructurales: dique direccional en frente del Terminal Marítimo de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura, dique direccional en frente del Muelle Petrolero, cierre del Piñal Norte, desvío parcial del río Dagua y desvío total del río Dagua; con el fin de reducir las tasas de sedimentación en la bahía. Los resultados obtenidos muestran que la implementación del desvío total del río Dagua es la mejor alternativa estructural, dado que se disminuyeron las tasas de sedimentación y las concentraciones de sedimentos en suspensión en las zonas próximas a los terminales marítimos, pasando de 0.044 m por ciclo mareal en condición actual de la bahía a 0.026 m por ciclo mareal con la construcción de la desviación del río Dagua.

En general los resultados hidrodinámicos y sedimentológicos obtenidos en cada una de las simulaciones se consideran aceptables, por lo cual se pueden utilizar en diferentes estudios y proyectos relacionados con modelación matemática e implementación de alternativas estructurales en la Bahía de Buenaventura.

Palabras claves: Bahía de Buenaventura, hidrodinámico, sedimentológico, sedimentación, modelo MOHID.

**PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE DIFERENTES MEDIDAS
ESTRUCTURALES PARA REDUCIR LAS TASAS DE SEDIMENTACIÓN EN
EL CANAL DE ACCESO Y LAS ZONAS DE APROXIMACIÓN A LOS
TERMINALES MARÍTIMOS EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA**

Mg. JOSE LUIS GARCIA
DIRECTOR

Mg. CARLOS ALBERTO RAMIREZ
CO-DIRECTOR

Mg. CARLOS OMAR AYALA
JURADO

Mg. JAIME ROJAS
JURADO

AGRADECIMIENTOS

Especialmente a mis padres y hermana por su apoyo incondicional y ser mi guía en todos los caminos.

A Dios por no dejarme desfallecer ante las dificultades, y permitirme culminar este ciclo en mi vida.

A mis profesores en especial a Carlos Ramírez Callejas y a José Luis García, por su apoyo y confianza y capacidad para guiarme en este proyecto de investigación.

A mis compañeros del grupo de investigación HIDROMAR, por su solidaridad y momentos felices.

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron en el desarrollo de este nuevo logro.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
3	FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA DE LA INVESTIGACIÓN	4
4	OBJETIVOS.....	5
4.1	OBJETIVO GENERAL.....	5
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
5	JUSTIFICACIÓN	6
6	MARCO DE REFERENCIA.....	9
6.1	ANTECEDENTES	9
6.2	ESTADO DEL ARTE	11
6.2.1	ECUACIONES HIDRODINÁMICAS.....	11
6.2.2	SOLUCIÓN NUMÉRICA	12
6.2.3	SEDIMENTACIÓN.....	12
6.2.4	EROSIÓN.....	15
6.2.5	MOHID	16
6.2.6	CONSTRUCCIÓN DEL DOMINIO.....	19
6.2.7	CONDICIONES DE FRONTERA.....	19
6.2.8	CONDICIONES INICIALES	19
7	METODOLOGÍA	20
7.1.1	RECOPILACIÓN, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	20
7.1.2	CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y SEDIMENTOLÓGICA.....	21
7.1.3	IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	21
7.1.4	PLANTEAMIENTO DE LAS MEDIDAS ESTRUCTURALES	22
7.1.5	MODELACIÓN DE LAS MEDIDAS ESTRUCTURALES.....	22
7.1.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL.....	22
8	RESULTADOS Y DISCUSIONES	23
8.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA BAHÍA	23
8.1.1	DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA BAHÍA	23
8.1.2	ASPECTOS HIDROMETEREOLÓGICOS.....	25
8.1.3	ASPECTOS FLUVIALES.....	36
8.1.4	ASPECTOS OCEANOGRÁFICOS	37
8.1.5	ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS.....	40

8.2	IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO	44
8.2.1	SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE MALLA, INTERVALO DE TIEMPO Y ORIENTACIÓN DE LA MALLA	44
8.2.2	ESQUEMATIZACIÓN DE LA BATIMETRÍA	45
8.2.3	CONDICIONES DE FRONTERA	47
8.2.4	CONDICIONES INICIALES	49
8.2.5	CALIBRACIÓN DEL MODELO	50
8.2.6	CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA	51
8.2.7	CALIBRACIÓN SEDIMENTOLÓGICA	56
8.2.8	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	59
8.2.9	VERIFICACIÓN DEL MODELO	66
8.3	PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES	68
8.3.1	ALTERNATIVAS ESTUDIADAS	68
8.3.2	EVALUACIÓN	69
8.3.3	RESULTADO DE LA IMPLEMENTACIÓN	71
8.4	ANÁLISIS DE COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES	81
8.4.1	CONDICIÓN NATURAL VS CONDICIÓN MODIFICADA MEDIANTE CONSTRUCCIÓN DE DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL TERMINAL MARÍTIMO DE BUENAVENTURA	81
8.4.2	CONDICIÓN NATURAL VS CONDICIÓN MODIFICADA MEDIANTE CONSTRUCCIÓN DE UN DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL MUELLE PETROLERO	82
8.4.3	CONDICIÓN NATURAL VS CONDICIÓN MODIFICADA MEDIANTE EL CIERRE DEL PIÑAL NORTE	83
8.4.4	CONDICIÓN NATURAL VS CONDICIÓN MODIFICADA MEDIANTE EL DESVÍO TOTAL DEL RÍO DAGUA	84
8.4.5	CONDICIÓN NATURAL VS CONDICIÓN MODIFICADA MEDIANTE EL DESVÍO PARCIAL DEL RÍO DAGUA	84
9	CONCLUSIONES	87
9.1	CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y SEDIMENTOLÓGICA DE LA BAHÍA	87
9.2	MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y SEDIMENTOLÓGICA	88
9.3	ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES	89
10	RECOMENDACIONES	92
11	BIBLIOGRAFÍA	93

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 BAHÍA DE BUENAVENTURA (BANCO DE OCCIDENTE, 2002)	2
FIGURA 2 DATOS HISTÓRICOS DE DRAGADO DE MANTENIMIENTO (HASKONING; UNIVERSIDAD DEL VALLE, 1995).	6
FIGURA 3 ESQUEMA DE MOHID WATER, PRINCIPALES MÓDULOS INVOLUCRADOS (BARRETO, EZZATI, & FOSSATI, 2009).....	17
FIGURA 4 BAHÍA DE BUENAVENTURA Y SU CANAL DE ACCESO, EN VERDE BAHÍA INTERIOR, EN ROJO BAHÍA EXTERIOR	25
FIGURA 5 LOCALIZACIÓN ESTACIONES DEL IDEAM. FUENTE IDEAM 2017.	25
FIGURA 6 DIAGRAMA DE CAJAS Y ALAMBRES DE LA TEMPERATURA DEL AIRE ESTACIÓN AEROPUERTO, PERIODO 1962-2014. FUENTE IDEAM 2016	26
FIGURA 7 DIAGRAMA DE CAJAS Y ALAMBRES DE LA TEMPERATURA DEL AIRE ESTACIÓN COLPUERTOS, PERIODO 1969-2000. FUENTE IDEAM 2016	26
FIGURA 8 TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE DE MAR EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA. FUENTE INVEMAR 2015.....	27
FIGURA 9 DIAGRAMA DE CAJAS Y ALAMBRES PARA LA HUMEDAD RELATIVA EN LA ESTACIÓN AEROPUERTO, PERIODO 1962-2014. FUENTE IDEAM 2016.	28
FIGURA 10 DIAGRAMA DE CAJAS Y ALAMBRES PARA LA HUMEDAD RELATIVA EN LA ESTACIÓN COLPUERTOS PERIODO 1969-2000. FUENTE IDEAM 2016.	28
FIGURA 11 DIAGRAMA DE CAJAS Y ALAMBRES PARA LA PRECIPITACIÓN ESTACIÓN AEROPUERTO, PERIODO 1946-2016 .FUENTE IDEAM 2016.	29
FIGURA 12 DIAGRAMA DE CAJAS Y ALAMBRES PARA LA PRECIPITACIÓN ESTACIÓN COLPUERTOS, PERIODO 1969-2001.FUENTE IDEAM 2016.	30
FIGURA 13 DIAGRAMA DE CAJAS Y ALAMBRES DEL NÚMERO DE DÍAS DE PRECIPITACIÓN MENSUAL, ESTACIÓN AEROPUERTO, PERIODO 1946-2016. FUENTE IDEAM 2016.	30
FIGURA 14 DIAGRAMA DE CAJAS Y ALAMBRES DEL NÚMERO DE DÍAS DE PRECIPITACIÓN MENSUAL, ESTACIÓN COLPUERTOS, PERIODO 1969-2001. FUENTE IDEAM 2016.	31
FIGURA 15 DIAGRAMA DE CAJAS Y ALAMBRES PARA LA VELOCIDAD DEL VIENTO REGISTROS ESTACIÓN AEROPUERTO, PERIODO 1978-2012. FUENTE IDEAM 2016.	32
FIGURA 16 DIAGRAMA DE CAJAS Y ALAMBRES PARA LA VELOCIDAD DEL VIENTO REGISTROS ESTACIÓN COLPUERTOS, PERIODO 1982-2001. FUENTE IDEAM 2016.	32
FIGURA 17 ROSA DE VIENTO DE ESTACIÓN AEROPUERTO DE BUENAVENTURA Y COLPUERTOS RESPECTIVAMENTE. FUENTE IDEAM.	33
FIGURA 18 NUBOSIDAD MEDIA MENSUAL MULTIANUAL DE LAS ESTACIONES DEL IDEAM. FUENTE IDEAM 2016.	34
FIGURA 19 DIAGRAMAS DE CAJAS Y ALAMBRES. BRILLO SOLAR REGISTROS ESTACIÓN AEROPUERTO, PERIODO 1975-2014. FUENTE IDEAM 2016.	35
FIGURA 20 DIAGRAMAS DE CAJAS Y ALAMBRES. BRILLO SOLAR REGISTROS ESTACIÓN COLPUERTOS, PERIODO 1969-2001. FUENTE IDEAM 2016.	35
FIGURA 21 LÍNEA DE COSTA QUE DELIMITA LA BAHÍA.....	44
FIGURA 22 MALLA DE CALCULO QUE DELIMITA EL DOMINIO A MODELAR.....	44
FIGURA 23 BATIMETRÍA GENERADA EN LOS RÍOS ANCHICAYÁ Y DAGUA RESPECTIVAMENTE.....	46
FIGURA 24 BATIMETRÍA DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA.....	47
FIGURA 25 PUNTOS DE GENERACIÓN DE MAREA EN LA FRONTERA ABIERTA.....	48
FIGURA 26 POLÍGONOS CREADOS PARA LA GENERACIÓN DE DESCARGAS EN LOS RÍOS AGUADULCE, SAN ANTONIO, DAGUA Y ANCHICAYÁ RESPECTIVAMENTE	49
FIGURA 27 CAJAS PARA INGRESO DE LA CONDICIÓN INICIAL DE LOS SEDIMENTOS EN LA BAHÍA.	50
FIGURA 28 PUNTOS DE CONTROL O "TIME SERIES" DE LA BAHIA.....	52

FIGURA 29 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE REGRESIÓN LINEAL PARA EL COEFICIENTES DE RUGOSIDAD EN LOS PUNTOS DE MEDICIÓN MUELLE Y BOCANA.	53
FIGURA 30 CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PARA CADA RUGOSIDAD.	53
FIGURA 31 NIVELES DE MAREA MEDIDOS Y CALCULADOS EN EL MUELLE EMPLEANDO RUGOSIDAD DE MANNING 0.028 Y VISCOSIDAD TURBULENTA 5 M ² /S	54
FIGURA 32 NIVELES DE MAREA MEDIDOS Y CALCULADOS EN LA BOCANA EMPLEANDO RUGOSIDAD DE MANNING 0.028 Y VISCOSIDAD TURBULENTA 5 M ² /S	55
FIGURA 33 NIVELES DE MAREA Y VELOCIDADES CALCULADAS EN EL MUELLE.....	55
FIGURA 34 NIVELES DE MAREA Y VELOCIDADES CALCULADAS EN LA BOCANA.....	56
FIGURA 35 VELOCIDAD DE CAÍDA PARA TAMAÑOS DE PARTÍCULAS MENORES A 100 UM DE ACUERDO CON STOKES.....	58
FIGURA 36 VELOCIDAD DE CAÍDA PARA TAMAÑOS DE PARTÍCULAS MAYORES A 100 UM DE ACUERDO CON EL COMITÉ INTERINSTITUCIONAL DE LOS ESTADOS UNIDOS (1957).	58
FIGURA 37 CALIBRACIÓN SEDIMENTOLÓGICA DE LA BAHÍA; CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN EN LAS ESTACIONES BOCANA Y MUELLE.	59
FIGURA 38 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN LOS NIVELES DE MAREA EN EL MUELLE DE LA SRPB.....	60
FIGURA 39 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN LOS NIVELES DE MAREA EN LA BOCANA.....	61
FIGURA 40 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN LAS VELOCIDADES DEL FLUJO EN EL MUELLE DE LA SPRB.....	61
FIGURA 41 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD EN LAS VELOCIDADES DEL FLUJO EN LA BOCANA.....	62
FIGURA 42 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO. INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD TURBULENTA EN LOS NIVELES DE MAREA EN EL MUELLE.....	62
FIGURA 43 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO. INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD TURBULENTA EN LOS NIVELES DE MAREA EN LA BOCANA.	63
FIGURA 44 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO. INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD TURBULENTA EN LAS VELOCIDADES DEL FLUJO EN EL MUELLE.	63
FIGURA 45 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO. INFLUENCIA DE LA VISCOSIDAD TURBULENTA EN LAS VELOCIDADES DEL FLUJO EN LA BOCANA.....	64
FIGURA 46 COMPORTAMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES PARA LOS DIFERENTES ESFUERZOS Y VELOCIDADES DE CAÍDA EN LA ESTACIÓN BOCANA.....	65
FIGURA 47 COMPORTAMIENTO DE LAS CONCENTRACIONES PARA LOS DIFERENTES ESFUERZOS Y VELOCIDADES DE CAÍDA EN LA ESTACIÓN MUELLE.....	65
FIGURA 48 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES INICIALES DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN. ESTACIÓN BOCANA.....	66
FIGURA 49 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA DIFERENTES CONCENTRACIONES DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN. ESTACIÓN MUELLE	66
FIGURA 50 VERIFICACION DEL MODELO HIDRODINAMICO: NIVELES DE MAREA EN EL MAREÓGRAFO, MEDIDOS Y MODELADOS.	67
FIGURA 51 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE LOS RANGOS DE MAREA EN LA ESTACIÓN MAREÓGRAFO (1980 – 2016)	68
FIGURA 52 ALTERNATIVA ESTRUCTURAL. DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL TERMINAL MARÍTIMO	69
FIGURA 53 ALTERNATIVA ESTRUCTURAL. DIQUE DIRECCIONAL EN FRENTE DEL MUELLE PETROLERO	69
FIGURA 54 ALTERNATIVA ESTRUCTURAL. CIERRE DEL PIÑAL NORTE.....	70
FIGURA 55 DESVIACIÓN TOTAL DEL RÍO DAGUA.....	71
FIGURA 56 DESVIACIÓN PARCIAL DEL RÍO DAGUA	71
FIGURA 57 PUNTOS DE CONTROL ESTABLECIDOS PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	72
FIGURA 58 VELOCIDADES OBTENIDAS PARA CADA CONDICIÓN EN EL PUNTO DE CONTROL MAREÓGRAFO	73
FIGURA 59 VELOCIDADES OBTENIDAS PARA CADA CONDICIÓN EN EL PUNTO DE CONTROL MUELLE	73

FIGURA 60 VELOCIDADES OBTENIDAS PARA CADA CONDICIÓN EN EL PUNTO DE CONTROL MANIOBRAS	74
FIGURA 61 VELOCIDADES OBTENIDAS PARA CADA CONDICIÓN EN EL PUNTO DE CONTROL CANAL	74
FIGURA 62 CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN PARA CADA UNA DE LAS CONDICIONES, PUNTO DE CONTROL MAREÓGRAFO.....	75
FIGURA 63 CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN PARA CADA UNA DE LAS CONDICIONES, PUNTO DE CONTROL MUELLE.	75
FIGURA 64 CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN PARA CADA UNA DE LAS CONDICIONES, PUNTO DE CONTROL MANIOBRAS.	76
FIGURA 65 CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN PARA CADA UNA DE LAS CONDICIONES, PUNTO DE CONTROL CANAL.....	76
FIGURA 66 TASAS DE SEDIMENTACIÓN PARA LAS DIFERENTES CONDICIONES, EN EL PUNTO DE CONTROL MAREÓGRAFO.	77
FIGURA 67 TASAS DE SEDIMENTACIÓN PARA LAS DIFERENTES CONDICIONES, EN EL PUNTO DE CONTROL MUELLE.....	77
FIGURA 68 TASAS DE SEDIMENTACIÓN PARA LAS DIFERENTES CONDICIONES, EN EL PUNTO DE CONTROL MANIOBRAS.....	78
FIGURA 69 TASAS DE SEDIMENTACIÓN PARA LAS DIFERENTES CONDICIONES, EN EL PUNTO DE CONTROL CANAL.	78
FIGURA 70 TASAS DE SEDIMENTACIÓN EROSIÓN EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA. 0 - CONDICIÓN NATURAL; 1 –DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL TERMINAL MARÍTIMO; 2 – DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL MUELLE AL MUELLE PETROLERO; 3 – CIERRE DEL PIÑAL NORTE; 4- DESVIACIÓN TOTAL DEL RÍO DAGUA; 5 – DESVIACIÓN PARCIAL DEL RÍO DAGUA.	79
FIGURA 71 TASAS DE SEDIMENTACIÓN EROSIÓN EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA. 0 - CONDICIÓN NATURAL; 1 –DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL TERMINAL MARÍTIMO; 2 – DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL MUELLE AL MUELLE PETROLERO; 3 – CIERRE DEL PIÑAL NORTE; 4- DESVIACIÓN TOTAL DEL RÍO DAGUA; 5 – DESVIACIÓN PARCIAL DEL RÍO DAGUA.	80

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 COORDENADAS Y ALTURA DE LA UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES DEL IDEAM. FUENTE IDEAM 2017.	25
TABLA 2 TEMPERATURA DEL AIRE MEDIA MENSUAL MULTIANUAL. FUENTE IDEAM 2016.	27
TABLA 3 HUMEDAD RELATIVA. FUENTE IDEAM 2016.	29
TABLA 4 PRECIPITACIÓN. FUENTE IDEAM 2016.	30
TABLA 5 DÍAS DE PRECIPITACIÓN. FUENTE IDEAM 2016.	31
TABLA 6 VELOCIDAD DEL VIENTO. FUENTE IDEAM 2016.	32
TABLA 7 DIRECCIÓN Y FRECUENCIA RELATIVA DEL VIENTO ESTACIÓN AEROPUERTO DE BUENAVENTURA. FUENTE IDEAM.	33
TABLA 8 DIRECCIÓN Y FRECUENCIA RELATIVA DEL VIENTO ESTACIÓN COLPUERTOS. FUENTE IDEAM.	33
TABLA 9 NUBOSIDAD MEDIA. FUENTE IDEAM 2016.	34
TABLA 10 BRILLO SOLAR. FUENTE IDEAM 2016.	35
TABLA 11 ÁREAS DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS TRIBUTARIOS DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA. FUENTE (QUIROS J. & PALACIOS O., 2006).	36
TABLA 12 CAUDALES MÍNIMOS, MEDIOS Y MÁXIMOS REGISTRADOS DE LOS RÍOS Y ESTEROS TRIBUTARIOS DE LA BAHÍA DE BUENAVENTURA. FUENTE (QUIROS J. & PALACIOS O., 2006).	37
TABLA 13 NIVELES DE REFERENCIA. FUENTE (MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2014).	38
TABLA 14 COMPONENTES ARMÓNICAS DE LA MAREA EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA OBTENIDAS CON EL MODELO FES2004.	48
TABLA 15 CONCENTRACIONES MÍNIMAS Y MÁXIMAS ENCONTRADAS EN LOS RÍOS Y ESTEROS EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA	49
TABLA 16 CONCENTRACIONES DE SEDIMENTOS INGRESADAS POR CAJAS EN EL MODELO	50
TABLA 17 COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE CONTROL O "TIME SERIES" DE LA BAHIA	52
TABLA 18 COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN PARA CADA RUGOSIDAD EN LOS PUNTOS DE MEDICIÓN, PARA LOS NIVELES DE MAREA	53
TABLA 19 ESFUERZOS CRÍTICOS DE SEDIMENTACIÓN Y VELOCIDAD DE CAÍDA	57
TABLA 20 ESFUERZO CRITICO DE EROSIÓN	57
TABLA 21 COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE CONTROL ESTABLECIDOS PARA EL ANÁLISIS DE RESULTADOS	72
TABLA 22 TASAS DE SEDIMENTACIÓN EN EL TERMINAL MARÍTIMO DE LA SOCIEDAD PORTUARIA REGIONAL DE BUENAVENTURA PARA UN CICLO CUASI-QUINCENAL DE MAREAS VIVAS EXTREMAS.	86
TABLA 23 TASAS DE SEDIMENTACIÓN EN EL MUELLE PETROLERO PARA UN CICLO CUASI-QUINCENAL DE MAREA VIVAS EXTREMAS	86
TABLA 24 TASAS DE SEDIMENTACIÓN EN EL CANAL DE ACCESO PARA UN CICLO CUASI-QUINCENAL DE MAREA VIVAS EXTREMAS	86

1 INTRODUCCIÓN

La Bahía de Buenaventura presenta problemas de sedimentación en diferentes zonas, especialmente en el canal de acceso y en las zonas de aproximación a los terminales marítimos, con lo cual se disminuye la profundidad útil para la navegación, obligando a frecuentes y costosas operaciones de dragado. La sedimentación es ocasionada principalmente por las descargas de los ríos y esteros que desembocan en la bahía.

Esta investigación tiene por objeto conocer el comportamiento hidrodinámico de la bahía de Buenaventura, la distribución de los aportes fluviales y marinos en el estuario y analizar diferentes alternativas técnicas de solución al problema de sedimentación. Para ello se implementó el modelo matemático MOHID.

En el desarrollo del estudio inicialmente se realizó la caracterización física de la Bahía, en especial de los aspectos hidrodinámicos y sedimentológicos más destacados. Posteriormente se implementó un modelo matemático hidrodinámico y sedimentológico de la Bahía, incluyendo los diferentes esteros y ríos tributarios. Finalmente se plantearon, simularon y evaluaron diferentes medidas estructurales con el fin de disminuir las tasas de sedimentación en el canal de navegación y en los sectores próximos a los terminales marítimos existentes. Las medidas estructurales planteadas fueron las siguientes: (i) Dique direccional en frente del Terminal Marítimo, (ii) Dique direccional en frente del muelle Petrolero, (iii) Cierre del Piñal Norte, (iv) Desviación total del Río Dagua, (v) Desviación parcial del Río Dagua.

La desviación total del caudal del Río Dagua mediante un canal artificial hacia el estero Hondo mostro ser la alternativa más promisoría ya que disminuye las concentraciones de sedimentos en suspensión en toda el área circundante a la Isla Cascajal y, por ende, produce una mayor reducción en las tasas de sedimentación en las zonas de aproximación a los terminales marítimos de Buenaventura.

2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Muchos estuarios, bahías y ensenadas en el mundo son frecuentemente utilizados para la localización y ubicación de puertos, puesto que ellos ofrecen condiciones favorables para la navegación; estos sistemas actúan como barreras naturales que protegen las embarcaciones de la acción severa de las corrientes y el oleaje (Universidad del Valle, 1997).

En el suroccidente Colombiano sobre el océano Pacífico está ubicado el Puerto de Buenaventura, a través del cual se moviliza el 42.6% de la carga de importación y exportación por medio marítimo de Colombia (Figura 1) (CCBUN, 2016). De esta manera el Puerto de Buenaventura desempeña un papel protagónico en las estrategias del Gobierno Colombiano para la apertura económica con otros países.



Figura 1 Bahía de Buenaventura (Banco de Occidente, 2002)

El comportamiento morfodinámico del sistema de la bahía de Buenaventura afecta la accesibilidad al Puerto dado que presenta problemas de sedimentación en diferentes sectores, en mayor proporción, en las zonas de maniobras y los muelles de los diferentes terminales marítimos. Debido a esto es necesario el mantenimiento por medio de dragados frecuentes y costosos que garanticen las profundidades adecuadas en el canal de acceso, las zonas de maniobras y los atracaderos.

La sedimentación en la bahía es una limitante para los diferentes terminales marítimos existentes y para el desarrollo de nuevos puertos. El canal de acceso presenta un índice promedio de sedimentación entre 0.2 y 0.3 metros anuales, y en las zonas de maniobras y de los muelles se han observado mayores índices de sedimentación, cercanos a los 1.7

metros por año; los apreciables volúmenes de sedimentos que llegan a las zonas portuarias combinados con las bajas velocidades de las corrientes mareales son las principales causas de este problema (HASKONING; Universidad del Valle, 1995).

Los principales aportes de sedimentos a la bahía de Buenaventura provienen de los ríos Anchicayá y Dagua, cuyas cuencas se encuentran altamente intervenidas, especialmente la del río Dagua.

Estas actividades de dragado pueden afectar la navegación y generar riesgo de colisiones entre embarcaciones. Como alternativa de solución al problema de la sedimentación, diferente al dragado, se pueden plantear y evaluar diferentes medidas estructurales, con las cuales se pretende reducir los volúmenes de sedimentos que llegan y se depositan en el canal de acceso y las zonas portuarias.

En el presente estudio se plantearon y evaluaron, mediante la simulación numérica, diferentes medidas estructurales en la bahía de Buenaventura con el fin de reducir las tasas de sedimentación, principalmente en el canal de acceso y las zonas portuarias. Para llevar a cabo este análisis se utiliza el modelo matemático MOHID, software desarrollado por MARETEC (Centro de Investigación Marina y del Medio Ambiente) que pertenece al Instituto Superior Técnico (IST) de la Universidad Técnica de Lisboa, Portugal (MARETEC, 2002).

3 FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA DE LA INVESTIGACIÓN

¿Cómo las diferentes medidas estructurales pueden contribuir a la disminución de las tasas de sedimentación en el canal de acceso y las zonas de aproximación a los diferentes terminales marítimos existentes en la bahía de Buenaventura?

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Plantear y evaluar diferentes medidas estructurales para disminuir las tasas de sedimentación en el canal de acceso y las zonas de aproximación a los terminales marítimos en la bahía de Buenaventura.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar físicamente la bahía de Buenaventura
- Implementar un modelo matemático hidrodinámico y sedimentológico de la bahía de Buenaventura
- Plantear y modelar matemáticamente diferentes alternativas estructurales para reducir las tasas de sedimentación en el canal de acceso y las zonas de aproximación a los terminales marítimos en Buenaventura.
- Analizar comparativamente los efectos de las diferentes medidas estructurales en la hidrodinámica y las tasas de sedimentación en la bahía, especialmente en el canal de acceso y en las zonas de aproximación a los terminales marítimos de Buenaventura.

5 JUSTIFICACIÓN

La Bahía de Buenaventura presenta unas condiciones hidrodinámicas, sedimentológicas y morfológicas complejas debido a la interacción de diferentes factores como mareas, el oleaje originado por la acción de los vientos, las descargas de sedimentos y agua dulce de los diferentes tributarios, los sedimentos arrastrados por las corrientes marinas, la morfología de la zona y la hidrodinámica del mar en el interior y exterior de la Bahía.

En el estudio realizado por Haskoning y la Universidad del Valle en el año 1995 se determinó que en los años comprendidos entre 1991 y 1995 los volúmenes dragados eran significativamente mayores a los presentados en el periodo 1973 a 1989, y a su vez los costos de dragado aumentaban paralelamente. En la siguiente Figura se presentan los volúmenes de sedimentos dragados.

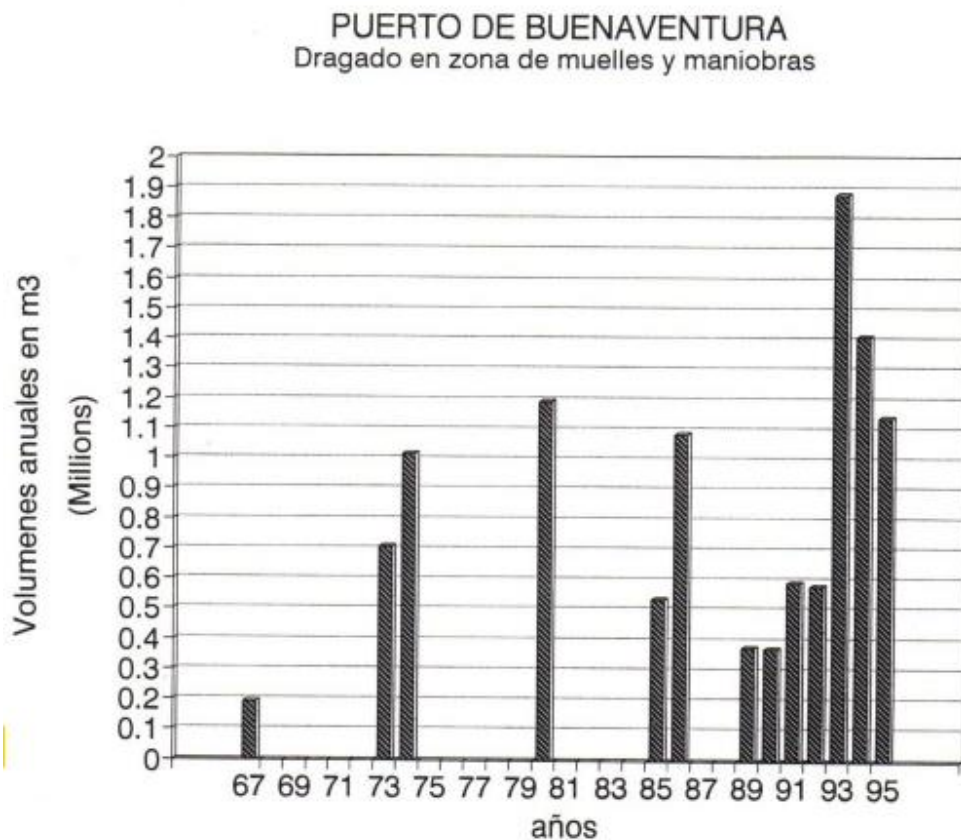


Figura 2 Datos históricos de dragado de mantenimiento (HASKONING; Universidad del Valle, 1995).

Entre los años 1995 a 1997 se llevó a cabo el dragado de profundización del canal de acceso al puerto de Buenaventura con el fin de obtener en toda su extensión una profundidad de 10 m (con respecto al nivel de sicigia o nivel promedio de la mareas mínimas); esto con el fin de facilitar la accesibilidad a los terminales y mejorar las seguridades de navegación. El volumen total de sedimentos dragados fue de 7.674.000 m³ y el costo de dicho proyecto fue de \$ 25.066.060.000.00 (Rojas Muñoz, 1997).

En el año 2007 se culminó el siguiente dragado de profundización del canal por medio del cual se lograron profundidades de 12.5 m en la parte correspondiente a la bahía interna y de 10.5 m en la parte correspondiente a la bahía externa. Los volúmenes de sedimentos removidos fue de 5.344.040 m³ de los cuales 3.189.040 m³ fueron en la bahía interna y 2.155.000 m³ en la bahía externa, el costo del proyecto fue de \$ 81.000.000.000.00. El proyecto se llevó a cabo según las recomendaciones realizadas por Hidroestudios Moffatt & Nichol entre los 1997-1998 (Ministerio del Transporte, 2011).

Entre los años 2007 y 2010 se realizó el dragado de profundización del canal de acceso a 13.5 m en la bahía externa y el mantenimiento del canal en la bahía interna a una profundidad de 12.5 m; los volúmenes de sedimentos removidos fue 11.571.300 m³ en la bahía externa y de 1.627.500 m³ en la bahía interna. El costo de dicho proyecto fue de aproximadamente 43 millones de dólares (Ministerio del Transporte, 2011).

En el año 2011 el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) planteo una inversión de aproximadamente 54 millones de dólares para el mantenimiento del dragado del canal de acceso, de esta información no se conoce el volumen de sedimentos dragados (Periódico El País, 2011).

Para inicios del año 2012 se realizó un dragado de mantenimiento en el canal de acceso con el fin de aumentar las profundidades entre el kilómetro 19 al 25 dado que se encontraban profundidades menores a los 8.5 m. Por medio del dragado fueron removidos 800.000 m³ de sedimentos y se obtuvieron profundidades cercanas a 9.65 m para dicha zona; no se conoce el valor económico de dicho dragado (Periódico El País, 2012).

En el año 2014 el Gobierno Nacional Colombiano a través del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), realizó el dragado de mantenimiento para el canal de acceso al puerto de Buenaventura en la bahía externa entre las abscisas Km 18 a Km 26. El volumen de sedimentos removidos fue de 1.453.914 m³ y el costo del proyecto fue de \$ 14.351.000.000.00 (Instituto Nacional de Vías - INVIAS).

En el año 2015 el Instituto Nacional de Vías invirtió \$ 25.641.000.000.00 en dragado de mantenimiento del canal de acceso al puerto de Buenaventura. En este proyecto fueron removidos 2.235.704 m³ de sedimentos de los cuales 2.075.700 m³ fueron dragados en la bahía externa y 159.946 m³ en la bahía interna (Instituto Nacional de Vías - INVIAS).

En el año 2015 la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura invirtió 8.1 millones de dólares en el dragado de mantenimiento de la zona de maniobras del puerto y puestos de atraque; debido a la sedimentación natural que se presentaba en el entorno de la Bahía; la cantidad de sedimentos removidos fue de aproximadamente 800.000 m³, para mejorar las condiciones de seguridad náutica de las motonaves mercantes; el material removido fue depositado a una distancia de 35 kilómetros de la zona de dragado (Periódico EL TIEMPO, 2015).

En diciembre del año 2016 el Gobierno Nacional Colombiano adjudicó el dragado de mantenimiento del canal de acceso al puerto de Buenaventura que se realizaría en el año 2017 con el fin de seguir garantizando las profundidades de navegación de 12.5 m en la bahía interna y de 13.5 m en la bahía externa dicho dragado tiene como objetivo

remover aproximadamente 3.500.000 m³ de sedimentos y tiene un costo de \$ 108.000.000.000.00 (Periódico El Espectador, 2017).

Con base en lo anterior, se realiza el siguiente estudio con el fin de determinar la dinámica de las corrientes y los sedimentos, utilizando la información de campo disponible, para establecer y explicar el comportamiento de las corrientes y los sedimentos en la Bahía, en presencia de obras hidráulicas alternativas que buscan mitigar sus efectos.

Esto considerando que la intervención del hombre en la Bahía, a través de la localización y construcción de estructuras (espigones, diques direccionales, canales, etc.) originan un impacto, que puede afectar de manera positiva el comportamiento de las corrientes, las mareas y el control de las tasas de sedimentación; de tal manera, que los costos de mantenimientos y los volúmenes de dragado sean menores a los que actualmente se presentan.

6 MARCO DE REFERENCIA

La hidrodinámica, la sedimentación y diferentes alternativas de estructuras de intervención en la Bahía de Buenaventura han venido siendo estudiados desde hace más de 40 años a través de proyectos desarrollados por diferentes instituciones de investigación y firmas de consultoría; además, en la Universidad del Valle en los programas de ingeniería se han realizado diferentes tesis de grado en el tema.

6.1 ANTECEDENTES

Entre los diferentes estudios e investigaciones realizadas y relacionadas con el tema objeto de la presente investigación se pueden destacar los siguientes:

Consorcio dragado Buenaventura, HNV-CONCEP S.A.S. (2015):

Estudio y diseño del dragado de profundización del canal de acceso al puerto de Buenaventura – Valle del Cauca

Consultoría para el estudio y diseño del dragado de profundización del canal de acceso al Puerto de Buenaventura, que permita en el futuro inmediato efectuar las actividades de remoción de los materiales por debajo de la cota de mantenimiento actual (-12.5 m en la bahía interior y -13.5 m en la bahía exterior) hasta la nueva cota definida en función de las embarcaciones que en el futuro utilicen el Puerto y la definición del ancho de la solera del canal, los taludes laterales, los alineamientos y radios de giro requeridos para el tránsito seguro de dichas embarcaciones.

Universidad del Valle Laboratorio de Proyecto Hidráulicos del Pacífico (1999):

Estudio Hidrodinámico y Sedimentológico de la Bahía de Buenaventura Mediante la Implementación del Modelo Matemático MIKE 21

Estudio realizado para el Ministerio de Transporte, Dirección General de Transporte Marítimo en el año 1999, con el fin de determinar el comportamiento hidrodinámico y sedimentológico de la Bahía de Buenaventura empleando un modelo matemático.

Hidroestudios – Moffatt & Nichol (1998):

Estudio de factibilidad y diseño para la profundización del canal de acceso al puerto de Buenaventura.

En el periodo de 1996-1998 se realizó este estudio, en el cual se implementó un modelo matemático bidimensional del sistema de la Bahía de Buenaventura para evaluar el impacto de las diversas alternativas de profundización del canal sobre la hidrodinámica y la sedimentación del sistema, así como para estimar los volúmenes del dragado de mantenimiento anual.

Universidad del Valle Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico (1998):

Estudio Hidrosedimentológico del Canal de Acceso al Estero San Antonio Mediante la Implementación del Modelo Matemático MIKE 21

El informe contiene los estudios desarrollados para lograr una mejor comprensión del sistema actual de la bahía y analizar y evaluar las posibles variaciones en el sistema hidrodinámico y sedimentológico de la bahía debido a la implementación de las obras del proyecto del canal del estero San Antonio.

Universidad del Valle Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico (1997):
Evaluación Hidrodinámica de la implementación de barreras retenedoras frente a la zona de muelles del terminal marítimo de Buenaventura.

Estudio realizado para la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura que consistió en la determinación de los efectos de la hidrodinámica (específicamente las variaciones en las velocidades de la corriente) de la zona de muelles del Terminal Marítimo, ocasionados por la construcción de barreras retenedoras; estudio realizado en un modelo físico de la Bahía de Buenaventura.

Universidad del Valle Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico (1996):
Modelo físico de la bahía de Buenaventura.

El estudio contiene las actividades realizadas en el Proyecto Modelo Hidráulico de la Bahía de Buenaventura, con el objetivo de conocer mejor el comportamiento de la bahía y dar solución al grave problema de sedimentación que padece el Terminal Marítimo de Buenaventura.

HASKONING y Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico Universidad del Valle (1995):
Estudio para el dragado de la zona de maniobras y muelles del terminal marítimo de Buenaventura.

En el año 1995 HASKONING y la Universidad del Valle desarrollaron para la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura un estudio que consistió en el análisis y optimización del dragado de mantenimiento de la zona de maniobras y muelles del Puerto.

Hidroestudios – Dehave Nedeco (1963):

Entre los años de 1962 y 1963 Hidroestudios – Dehave Nedeco, realizó un estudio con el propósito de evaluar la factibilidad de las obras hidráulicas y portuarias propuestas para el mejoramiento del puerto de Buenaventura con mediciones de campo, los cuales comprendieron: batimetría, movimiento vertical de las mareas, corrientes, salinidad, transporte de sedimentos, composición del material del lecho y datos meteorológicos.

6.2 ESTADO DEL ARTE

Los modelos matemáticos bidimensionales son los más usados para simular y estudiar los diferentes procesos hidrodinámicos, de oleaje, sedimentológicos y de calidad del agua (transporte y dispersión de contaminantes) en zonas costeras, lagos, puertos, estuarios, embalses, etc. Existe una gran variedad de este tipo de modelos.

6.2.1 ECUACIONES HIDRODINÁMICAS

Las leyes de conservación son muy importantes en la mayoría de aplicaciones en ingeniería.

Ecuación de continuidad de la masa de agua (1):

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento en la dirección Y (2):

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dt} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 + h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial}{\partial y} (h_{\tau_{yy}}) + \frac{\partial}{\partial x} (h_{\tau_{xy}}) \right) \\ + \Omega q - fVV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento en la dirección X (3):

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{c^2 + h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left(\frac{\partial}{\partial x} (h_{\tau_{xx}}) + \frac{\partial}{\partial y} (h_{\tau_{xy}}) \right) \\ + \Omega p - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Dónde:

h	Profundidad del agua.
ζ	Elevación de la superficie libre del agua con respecto al nivel de referencia adoptado.
p,q (x,y,t)	Densidad de flujo o caudal unitario en las direcciones X y Y (m ³ /s/m). p=uh q=vh u= velocidad promedio en la dirección X. v= velocidad promedio en la dirección Y.
C (x,y)	Coficiente de Chezy para la fricción del fondo (m ^{1/2} /s).
g	Aceleración de la gravedad (m/s ²).
F (V)	Factor de fricción debido al viento.
V, Vx, Vy (x,y,t)	Velocidad del viento y sus componentes

$\Omega(x,y)$	en las direcciones X y Y (m/s). Parámetro de Coriolis, depende de la latitud (s^{-1}).
$p_a(x,y,t)$	Presión atmosférica ($kg/m/s^2$).
$\rho_w(x,y,t)$	Densidad del agua (kg/m^3).
x,y	Coordenadas espaciales horizontales (m).
t	Tiempo (s)
$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$	Componentes de los esfuerzos cortantes efectivos.

6.2.2 SOLUCIÓN NUMÉRICA

Las ecuaciones hidrodinámicas son resueltas mediante el método de volúmenes finitos, es un procedimiento de discretización utilizado para resolver ecuaciones diferenciales, basándose en la forma integral de las leyes de conservación. Se integra la ecuación diferencial original sobre un volumen finito, cuya forma depende de la malla y del sistema de coordenadas (Barreto, Ezzati, & Fossati, 2009).

En apariencia es similar al método de diferencias finitas. El método de volúmenes finitos permite introducir fácilmente condiciones de contorno, y la malla aparece solamente para definir el volumen y las áreas de las caras de la celda.

6.2.3 SEDIMENTACIÓN

La sedimentación o asentamiento de las partículas y flóculos puede ocurrir solamente cuando la velocidad media del flujo es suficientemente baja para permitir que las partículas caigan al fondo y se adhieran a él, sin que puedan ponerse en suspensión inmediatamente (Universidad del Valle, 1999). La tasa de sedimentación, S , puede ser expresada así (4):

$$S = \frac{w_c}{h_*} \left[\frac{\tau_b}{\tau_{cd}} - 1 \right], \tau_b \leq \tau_{cd} \quad (4)$$

Donde

- w_c = Velocidad media de caída o asentamiento de las partículas en suspensión
- h_* = Profundidad media a través de la cual las partículas se asientan.
- τ_{cd} = Esfuerzo cortante crítico para sedimentación.
- τ_b = Esfuerzo cortante de fondo.

De acuerdo con Mehta y Partheniades (1975) (Van Rijn, 1993), se pueden distinguir dos esfuerzos cortantes críticos de sedimentación: $\tau_{cd \text{ total}}$ y $\tau_{cd \text{ parcial}}$. El esfuerzo cortante crítico para sedimentación total, $\tau_{cd \text{ total}}$ es el esfuerzo cortante máximo por debajo del cual se presenta sedimentación de todas las partículas flóculos en suspensión (gruesos y finos). El esfuerzo cortante crítico para sedimentación parcial, $\tau_{cd \text{ parcial}}$ es el esfuerzo cortante mínimo por encima del cual no habrá más sedimentación de ningún tamaño de partículas o flóculos. En el rango de esfuerzos cortantes comprendido entre

estos dos valores limites produce solamente la sedimentación de las partículas más gruesas.

Cuando el material en suspensión presenta una gradación amplia, con partículas que varían desde arcillas finas hasta limos gruesos y arenas finas, el esfuerzo cortante critico de sedimentación puede presentar un rango amplio de valores. Mehta y Partheniades (1975) encontraron valores de τ_{cd} entre 0.18 y 1.1 N/m^2 , según las pruebas realizadas utilizando Caolinita. En estos casos de materiales no uniformes, la sedimentación total puede calcularse mediante la suma de las tasas de sedimentación de cada clase o tamaño de sedimentos. De acuerdo con Krone (1962), el esfuerzo cortante de sedimentación puede variar entre 0.06 y 0.1 N/m^2 y según Metha y Lott (1987) entre 0.04 y 1.0 N/m^2 , para la bahía de San Francisco Krone (1962) encontró $\tau_{cd} = 0.06 N/m^2$ cuando la concentración inicial de sedimentos en suspensión menor de 300 ppm. Para concentraciones mayores (entre 300 y 10000 ppm) obtuvo $\tau_{cd} = 0.078 N/m^2$.

De acuerdo con los valores experimentales reportados por Mehta (1984) y Winterwerp (1991) de pruebas realizadas con lodos de diferentes sitios, $\tau_{cd total}$ puede fluctuar entre 0.03 y 0.15 N/m^2 y $\tau_{cd parcial}$ entre 1.4 y 1.7 N/m^2 . El promedio de los valores reportados por estos investigadores arroja un valor de $\tau_{cd total} = 0.08 N/m^2$.

El esfuerzo cortante de fondo τ_b está dado por la expresión (5):

$$\tau_b = \rho g R i \quad (5)$$

Donde

R = Radio hidráulico

i = Gradiente hidráulico

Para canales anchos $R \cong h$, luego: $\tau_b = \rho g h i$. De la expresión de Manning para la velocidad del flujo se tiene (6):

$$V = \frac{1}{n} h^{2/3} i^{1/2} \quad \text{ó} \quad V = K h^{2/3} i^{1/2} \quad (6)$$

Luego:

$$V^2 = K^2 h^{4/3} i \quad (7)$$

$$h_i = \frac{V^2}{K^2 h^{1/3}} \quad (8)$$

Sustituyendo esta última expresión en la ecuación del esfuerzo cortante de fondo se tiene (9):

$$\tau_b = \rho g \frac{V^2}{K^2 h^{1/3}} \quad (9)$$

Dónde:

K = Inverso del coeficiente de rugosidad de Manning ($K = 1/n$)

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

Para el esfuerzo cortante crítico de sedimentación la expresión correspondiente será (10):

$$\tau_b = \rho g \frac{V_{cd}^2}{K^2 h^{1/3}} \quad (10)$$

Donde V_{cd} es la velocidad critica de sedimentación y representa a velocidad del flujo (promedio en profundidad) límite por encima de la cual no habrá más sedimentación de las partículas de sedimentos.

Despejando V_{cd} de la anterior expresión, se tiene (11):

$$V_{cd} = \left(\frac{\tau_b h^3}{\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

El esfuerzo crítico de sedimentación es un parámetro de entrada del modelo matemático. Se asume que la sedimentación ocurre cuando: $u_* \leq 1.25W$

W en la anterior formula se relaciona con una velocidad de caída o asentamiento “representativa”, la cual es normalmente mayor que la velocidad de asentamiento promedia. Esta velocidad de caída representativa es hallada al considerar los diferentes factores que afectan la velocidad de caída, como son, la distribución de tamaños de los sedimentos, el perfil de velocidades del flujo, las características de la floculación de las partículas *in-situ*, la concentración de sedimentos en suspensión, etc.

La velocidad de flujo crítica para asentamiento, V_{cd} , que representa la velocidad critica o máxima del flujo para que se produzca el asentamiento de las partículas, puede estimarse con base en el siguiente análisis.

$$\tau_b = \rho g R i \quad (5)$$

$$u_* = \left(\frac{\tau_b}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$u_* = (g h i)^{1/2} \quad (13)$$

Pero:

$$h_i = \frac{V^2}{K^2 h^{1/3}} \quad (14)$$

Luego:

$$u_* = g^{1/2} \frac{V}{K h^{1/6}} \quad (15)$$

Despejando la velocidad del flujo, V , de la anterior expresión (16):

$$V = \frac{K h^{1/6}}{g^{1/2}} u_* \quad (16)$$

Para que ocurra sedimentación se debe cumplir que $u_* \leq 1.25W$, luego la velocidad de flujo critica o máxima correspondiente para que ocurra sedimentación será (17):

$$V_{cd} = 1.25W \frac{K h^{1/6}}{g^{1/2}} \quad (17)$$

Durante el proceso de asentamiento la velocidad de caída promedio, W , realmente disminuye porque el material más grueso se decantara primero que el material más fino. Este esfuerzo puede ser tenido en cuenta si se usa un valor constante pero relativamente bajo de la velocidad de caída promedio, W .

6.2.4 EROSIÓN

Los lodos pueden ser erodados por las corrientes dependiendo del grado de consolidación del material decantado. Los flóculos y partículas de sedimentos son erodados cuando los esfuerzos cortantes del fondo exceden un valor crítico (esfuerzo cortante crítico de erosión) (Universidad del Valle, 1999). Muchos investigadores han encontrado que el esfuerzo crítico para erosión es mayor que el esfuerzo cortante crítico para que se presente sedimentación total ($\tau_{ce} > \tau_{cd\ total}$).

Cuando la capa superior del lecho está compuesta por flóculos grandes muy fuertes, el esfuerzo cortante crítico para erosión de estos flóculos debe ser superior al esfuerzo cortante crítico para sedimentación parcial, porque los flóculos fuertes o más grandes fueron depositados durante un periodo de velocidades relativamente altas ($\tau_{ce} > \tau_{cd\ total}$).

Sin embargo, si la capa superior del lecho está conformada por flóculos pequeños y débiles depositados durante los periodos de velocidades bajas (justo después de pleamar y bajamar), el esfuerzo cortante requerido para erodar los flóculos débiles recientemente depositados debe ser menor que el esfuerzo cortante crítico para sedimentación total ($\tau_{ce} < \tau_{cd\ parcial}$).

La resistencia contra la erosión de los sedimentos cohesivos no depende solamente del peso sumergido de las partículas individuales sino casi exclusivamente de las fuerzas electroquímicas de cohesión, las cuales deben ser superadas por los esfuerzos cortantes antes de que la erosión comience.

En la actualidad no se dispone de una teoría general que permita estimar el esfuerzo cortante crítico de erosión.

Muchos investigadores han tratado de encontrar una relación para determinar el esfuerzo crítico de erosión en función de diferentes parámetros básicos, como el índice de plasticidad, la relación de vacíos, el contenido de humedad, etc. Sin embargo, hasta la fecha no existe una relación aceptada universalmente. La determinación de τ_{ce} debe hacerse mediante pruebas in-situ o en laboratorio empleando lodo natural.

Cada esfuerzo cortante de fondo está asociado con unas condiciones de flujo características. Así para cada esfuerzo cortante crítico de erosión se tiene o se puede estimar la velocidad (del flujo) crítica de erosión correspondiente. El esfuerzo cortante de fondo está dado por la expresión (18):

$$\tau_b = \rho g h i = \rho g \frac{v^2}{K^2 h^{1/3}} \quad (18)$$

Y es esfuerzo cortante crítico de erosión por la expresión (19):

$$\tau_{ce} = \rho g \frac{V_{ce}^2}{K^2 h^{1/3}} \quad (19)$$

Donde V y V_{ce} representa la velocidad promedio del flujo (en profundidad) y la velocidad mínima del flujo para que se inicie la erosión del material fino (lodos) del lecho, respectivamente.

La velocidad de flujo crítica para erosión puede variar significativamente dependiendo de las condiciones del flujo (rugosidad y profundidad) y de las características de consolidación del material fino del fondo (principalmente, el periodo de consolidación).

6.2.5 MOHID

Descripción del modelo matemático

El modelo matemático MOHID permite la adopción de una filosofía integrada de modelado, no solo de los procesos físicos y biogeoquímicos, sino también de diferentes escalas y sistemas como estuarios y cuencas, debido a la adopción de una filosofía de programación orientada a objetos (MARETEC, 2002).

MOHID se ha aplicado a diferentes casos de estudio, como las zonas costeras y estuarios, así como los procesos de sedimentación y embalses oceánicos, y se ha demostrado su capacidad de simular las características complejas.

MOHID Water

Es un programa numérico en tres dimensiones que simula diversos procesos que ocurren en cuerpos de agua como ríos, reservas, estuarios, áreas costeras u océanos. Es uno de los programas principales dentro del sistema de modelación de MOHID.

Este programa numérico fue diseñado para simular sistemas acuáticos considerando además los procesos de intercambio con otros medios, como ser la interacción con la atmósfera y con el fondo.

Este núcleo ejecutable de MOHID es el que se usará en el desarrollo de este trabajo de investigación dado que se adapta perfectamente a los objetivos planteados.

En la Figura 3 se muestra el esquema de funcionamiento de MOHID Water, sus principales módulos y la interacción entre ellos.

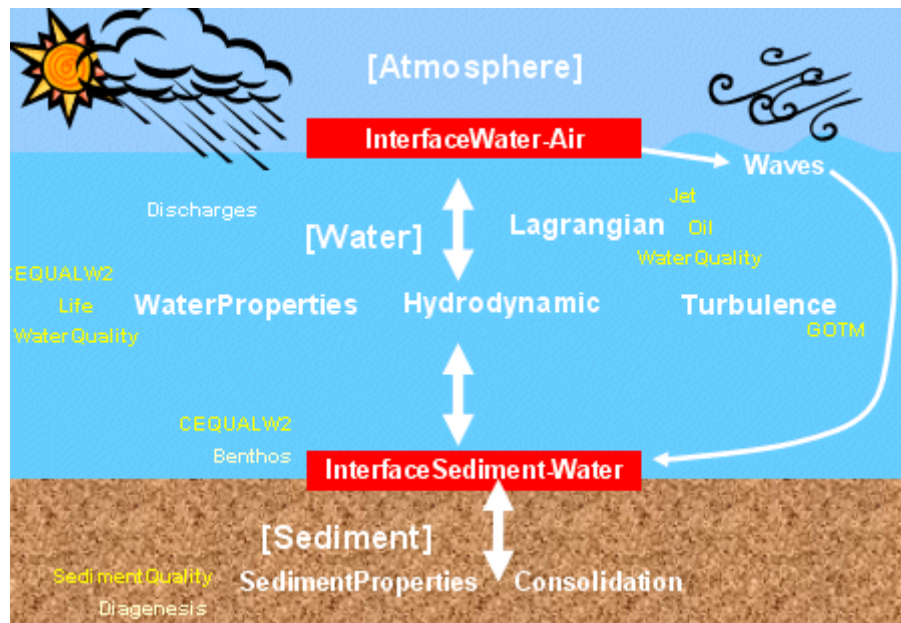


Figura 3 Esquema de MOHID Water, principales módulos involucrados (Barreto, Ezzati, & Fossati, 2009)

➤ Módulo Model

Es el módulo principal en la arquitectura del sistema. El módulo Model maneja toda la información de un solo modelo. Es responsable de construir, modificar y destruir cada modelo. También se encarga de controlar el flujo de información entre diferentes modelos y la evolución del tiempo de simulación. Coordina la ejecución del módulo Hydrodynamic y el módulo Transport, y depende de los módulos Hydrodynamic, WaterProperties y Lagrangian.

La coordinación de ejecución del modelo consiste en la actualización del tiempo global del modelo y la actualización de los módulos Transport e Hydrodynamic en un solo modelo.

Cuando se trabaja con modelos encajados las comunicaciones entre modelos se hacen en una sola vía y de forma recursiva, es decir, las condiciones iniciales y otros datos que se calculan durante la simulación se envían desde el padre al hijo.

➤ Módulo Geometry

El módulo Geometry (Geométrico) almacena y actualiza la información sobre los volúmenes finitos, calculando las áreas laterales y los volúmenes de la discretización según la demanda. Para realizar estos cálculos se basa en la elevación de la superficie libre calculada por el módulo hidrodinámico y en los datos batimétricos del dominio ingresados.

En el enfoque de volúmenes finitos usado en MOHID, permite que la resolución de las ecuaciones de conservación sea independiente de la geometría de cada celda o volumen de control, debido a que solo se requiere el flujo a través de las caras de la celda. De esta manera se logra una separación total entre las variables físicas y la geometría. Como los volúmenes pueden variar a lo largo de la simulación, la geometría es

calculado y/o actualizada en cada paso de simulación después de calcular las variables físicas. Además, las coordenadas verticales genéricas con diferentes subdominios. De hecho, el módulo Geometry puede dividir la columna del cuerpo de agua en diferentes tipos de coordenadas como Sigma (coordenadas diseñadas para simular variaciones importantes del fondo dado que siguen la forma del terreno), Cartesianas, Lagrangianas, de Espaciamiento Fijo (Fixed Spacing), Armónicas, etc.

El módulo Geometry proporciona datos a los módulos langrangian, turbulence y wáter properties.

➤ Módulo Hydrodynamic

El módulo Hydrodynamic (Hidrodinámico) calcula el nivel, la velocidad y el flujo de agua en cada paso de tiempo. La discretización espacial es realizada por una aproximación de volúmenes finitos y la discretización temporal se realiza con un algoritmo semi implícito ADI (Alternating Direction Implicit). Este algoritmo computa alternativamente una componente de la velocidad horizontal implícitamente mientras la otra es calculada explícitamente. El sistema de ecuaciones resultantes es tridiagonal y por lo tanto puede ser resuelto de manera eficiente por el algoritmo de Thomas.

➤ Módulo WaterProperties

El módulo WaterProperties (Propiedades del Agua) coordina y maneja la evolución de las propiedades del agua utilizando un modelo Euleriano de transporte. Para llevar a cabo esta tarea, se apoya o usa otros modelos como el de AdvectionDifussion (Advección - Difusión), encargado de calcular el transporte (por difusión o advección) de las propiedades, o el módulo WaterQuality (Calidad del Agua), el cual es uno de los tres módulos encargados de calcular procesos biogeoquímicos.

A través de este módulo, MOHID es capaz de simular diferentes propiedades como la temperatura, salinidad, sedimentos cohesivos, fitoplancton, nutrientes, contaminantes, etc.

➤ Módulo Surface

El módulo Surface (Superficie) plantea las condiciones de frontera en la superficie de la columna de agua y representa la influencia de forzantes externos atmosféricos como el viento y el sol en la superficie del agua.

Hay dos tipos de condiciones. Una dada por el usuario, usualmente los datos meteorológicos (velocidad del viento, temperatura del aire, etc), y otra como condiciones de borde calculadas automáticamente por el modelo a partir de las condiciones o datos meteorológicos.

➤ Módulo FreeVerticalMovement

El módulo FreeVerticalMovement (Movimiento Vertical Libre) calcula las propiedades del flujo vertical. Básicamente se usa para determinar el movimiento vertical del flujo (en la dirección vertical). Usualmente se utiliza este módulo para calcular la velocidad de caída al simular sedimentos cohesivos, o la velocidad de distintas partículas en las simulaciones de transporte.

➤ Módulo Turbulence

El módulo Turbulence (Turbulencia) calcula los coeficientes de viscosidad horizontal y vertical y las difusividades para diferentes métodos de cierre de turbulencia. Estas propiedades pueden ser calculadas de una manera simplificada utilizando coeficientes de difusión constantes. Por otro lado el usuario puede calcular la evolución de las propiedades de flujo turbulento de una manera más realista mediante el modelo GOTM (Global Ocean turbulence Model). Una interface de este módulo calcula los coeficientes utilizando un cierre de turbulencia de una o dos ecuaciones con la subrutina tomada del modelo general de turbulencia oceánica GOTM.

6.2.6 CONSTRUCCIÓN DEL DOMINIO

Para la construcción del dominio en MOHID, primero se inicializan las variables que almacenan los datos asociados a una grilla o modelo.

La malla o grilla es la representación discreta de la geometría del dominio en donde el problema va a ser resuelto. Divide la solución del dominio en una cantidad de subdominios (pueden ser elementos y volúmenes de control). En MOHID se puede realizar mallas rectangulares de igual tamaño en X y Y, rectangulares de diferente tamaño en X y Y (Braunschweig, Fernandes, & Lourenca, 2012).

Luego se genera la matriz de batimetría y se le asignan diferentes propiedades a todos los puntos del dominio.

6.2.7 CONDICIONES DE FRONTERA

Las condiciones hidrodinámicas a definir en las fronteras abiertas del modelo se denominan Condiciones de Frontera y revisten especial importancia durante el proceso de implementación de un modelo matemático. Se debe prestar especial atención para definir las condiciones de frontera, pues con mucha frecuencia estas son la causa de problemas (de inestabilidad) en la modelación.

6.2.8 CONDICIONES INICIALES

Para solucionar las ecuaciones diferenciales en el tiempo es necesario definir en el modelo las condiciones iniciales (hidrodinámicas, sedimentológicas, de calidad del agua, etc.), denominadas simplemente Condiciones Iniciales. Las condiciones hidrodinámicas iniciales usualmente requeridas por los modelos son los niveles de agua (o las profundidades de agua) y los caudales.

Estas condiciones iniciales corresponden a los valores de los parámetros en todos los puntos o celdas de la malla para el instante inicial ($t=0$) del periodo a simular.

7 METODOLOGÍA

El estudio de los procesos hidrodinámicos y sedimentológicos en la bahía y el planteamiento y evaluación de diferentes medidas estructurales para el control de la sedimentación en la bahía de Buenaventura se realizó de acuerdo con las siguientes fases:

7.1.1 RECOPIACIÓN, PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para realizar el estudio se consultó y recopiló información existente y disponible de proyectos y estudios realizados anteriormente sobre la hidrodinámica y los procesos de transporte de sedimentos en la bahía de Buenaventura y otros estuarios. La información obtenida de programas de medición de campo se clasificó teniendo en cuenta los sitios de muestreo y su representatividad.

Los informes de los estudios realizados por el Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico de la Universidad del Valle fueron los documentos base más importantes para el desarrollo de esta investigación.

7.1.1.1 Fuentes de información

La información recopilada en el estudio se obtuvo de las siguientes fuentes:

- Pronóstico de Pleamares y Bajamares en la Costa Pacífica Colombiana (IDEAM, 2016).
- Cartas Náuticas 153, 306 y 730 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (DIMAR, 2014).
- Información de caudales fluviales (IDEAM, 2016).
- Registros históricos de variables hidrometereológicas, temperatura superficial del mar y salinidad (CVC, 2016).
- Información de variables hidrometereológicas y marinas (IDEAM, 2016).
- Información de concentración de sedimentos obtenida del Monitoreo Fenómeno del Niño Canal de Acceso al Puerto de Buenaventura (LPHP, 1998).

7.1.1.2 Procesamiento y análisis

La información obtenida de las diferentes fuentes se procesó teniendo en cuenta las necesidades planteadas para caracterizar y modelar la bahía de Buenaventura. Para caracterizar la bahía se analizaron aspectos como la temperatura del aire y agua, la humedad relativa, la precipitación, la velocidad del viento, la nubosidad, el brillo solar, entre otros; esquematizando por medio de tablas y graficas los valores encontrados por cada aspecto.

Para propósitos de la modelación hidrodinámica y sedimentológica de la bahía se recopiló, procesó y analizó la información batimétrica, los registros de niveles de área,

las velocidades de las corrientes, el patrón de flujo, las concentraciones de sedimentos en suspensión, los caudales de los esteros y ríos tributarios, al igual que información relacionada con los procesos de transporte de sedimentos, como son los esfuerzos cortantes críticos de erosión y sedimentación y granulometría del material del lecho.

7.1.2 CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y SEDIMENTOLÓGICA

La caracterización hidrodinámica de la bahía de Buenaventura incluyó la descripción y el comportamiento de las mareas, el patrón de circulación de las corrientes y la distribución y tamaño de los sedimentos en la bahía y las descargas y aportes de sedimentos de los afluentes a la bahía.

De igual manera, se conocieron los valores de los aspectos hidrometeorológicos de la bahía como, la temperatura del aire, la humedad relativa, la precipitación, la velocidad del viento, la nubosidad, el brillo solar y la salinidad.

7.1.3 IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

La implementación del modelo matemático bidimensional MOHID en la bahía de Buenaventura comprendió las actividades:

- Esquematización de la bahía y determinación de parámetros:

De acuerdo con la información recolectada se determinaron las fronteras abiertas y cerradas del modelo, se seleccionó la malla o grilla a trabajar en el modelo y el tamaño de las celdas, se digitalizó la información de las cartas náuticas y por último se generó la batimetría de la Bahía.

- Ensayos de simulación preliminares

Se realizaron simulaciones preliminares donde se conocieron los parámetros necesarios para la alimentar el modelo, el funcionamiento general y la forma en que este presentaban los resultados y como se interpretaban.

- Análisis de sensibilidad del modelo

Se realizaron cambios en la rugosidad, la viscosidad turbulenta, las concentraciones de sedimentos y los esfuerzos de erosión y sedimentación con el fin de conocer el grado de influencia de cada uno de ellos en el comportamiento hidrodinámico y sedimentológico de la bahía, principalmente su incidencia en los niveles de marea, las velocidades de las corrientes mareales, las concentraciones de sedimentos en suspensión y las tasas de sedimentación y erosión.

- Calibración del modelo

Luego de conocer el grado de influencia de los parámetros en el análisis de sensibilidad y con base en los datos de campo se procedió a la calibración del modelo. Se determinó el valor de los parámetros en los cuales sus resultados se

asemejaban de mejor manera a los datos de campo; dando como resultado un modelo que se comporta similar a la Bahía en su condición natural.

7.1.4 PLANTEAMIENTO DE LAS MEDIDAS ESTRUCTURALES

Se plantearon diferentes medidas estructurales en la Bahía de Buenaventura; las medidas se plantearon en base a estudios previos realizados en la bahía para el control de la sedimentación, y se tienen en cuenta aspectos técnicos y ambientales. Las medidas estructurales planteadas consisten en la realización: (i) Dique direccional en frente del Terminal Marítimo, (ii) Dique direccional en frente del Muelle Petrolero, (iii) Cierre del Piñal Norte, (iv) Desvió total del Río Dagua, (v) Desvió parcial del Río Dagua.

7.1.5 MODELACIÓN DE LAS MEDIDAS ESTRUCTURALES

Primero se determinaron puntos de control en la zona de estudio como el Muelle, el Canal de acceso, la zona de Maniobras y el Mareógrafo, luego se modelaron las diferentes medidas estructurales planteadas, y se obtuvieron los resultados de cómo estas afectan el comportamiento en la hidrodinámica y la sedimentación en la Bahía de Buenaventura.

7.1.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ELABORACIÓN DEL INFORME FINAL

Se realizó el análisis comparativo de los resultados obtenidos en la fase anterior, con el fin de conocer el comportamiento hidrodinámico y sedimentológico de cada estructura en la bahía, y por último, determinando cual de todas las estructuras implementadas es la más eficiente en el control de la sedimentación en las zonas de interés.

8 RESULTADOS Y DISCUSIONES

8.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA BAHÍA

8.1.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA BAHÍA

La Bahía de Buenaventura se encuentra ubicada en la región sur-occidental de Colombia en la Costa Pacífica, en el departamento del Valle del Cauca, a una latitud de 3° 50' Norte y longitud 77° 06' oeste. Cuenta con una longitud aproximada 30 km, un ancho que varía entre 2.3 km y 4.5 km y tiene una forma alargada y angosta siguiendo una dirección suroeste-noreste. También presenta características estuarinas, es decir donde se generan los fenómenos fluvio-marítimos pertenecientes a las acciones del mar y los ríos y esteros que desembocan en la Bahía. La entrada está delimitada por las localidades de Punta Bazán (La Bocana) y Punta Soldado (Universidad del Valle, 1997).

Los terminales marítimos están localizados en la parte más interna de la Bahía de Buenaventura, algunos están localizados sobre la Isla Cascajal cuya posición geográfica corresponde a las coordenadas latitud 3° 53' norte y longitud 77° 05' oeste. Situada aproximadamente a 7 msnm.

La Bahía de Buenaventura está conformada por bosques tropicales húmedos, cubierta por una densa vegetación arbórea que se compone de una gran variedad de especies.

A continuación se mencionan los sistemas hídricos de la Bahía de Buenaventura:

- Río Dagua.
- Río Anchicayá, Brazo principal.
- Río Anchicayá, Brazo Seco.
- Río Anchicayá, Brazo Humane.
- Estero Aguadulce.
- Estero San Antonio.
- Estero Aguacate.
- Estero Gamboa.
- Estero Hondo.
- Estero Limones.
- Estero Fabián.

La Bahía de Buenaventura está compuesta de dos grandes áreas bien definidas como son: La Bahía interior y la Bahía Exterior, comunicadas por un canal de acceso el cual permite el tránsito desde mar afuera hasta el terminal marítimo de Buenaventura.

8.1.1.1 Bahía exterior

La bahía exterior está en comunicación directa con el mar abierto y su extensión es de aproximadamente 20 km; en la entrada, el fondo presenta una formación a manera de barra submarina con una extensión de aproximada de 8 km y profundidades

relativamente bajas de arenas medias y sueltas que limitan el acceso durante las mareas bajas al terminal marítimo (Universidad del Valle, 1999).

8.1.1.2 Bahía interior

La bahía interior es una zona estuarina con una extensión aproximadamente de 15 km, un ancho que varía entre 2.2 km a 4.5 km y una profundidad media de 10 m con respecto al nivel medio del mar y 8 m con relación al nivel medio de las bajamareas mínimas.

La entrada de la bahía se conoce como La Bocana y está determinada por tierra firme: al norte por Punta Bazán y al Sur por Punta Soldado. Además, cuenta con una protección natural, limitando el oleaje producido por los vientos a olas de 0.60 a 0.90m de altura máxima (Universidad del Valle, 1999).

8.1.1.3 Canal de acceso

El canal de acceso marítimo (ver Figura 4) tiene una longitud aproximada de 30.5 km. Los primeros 15 Km están en la bahía interior, desde el frente del muelle del Terminal marítimo concesionado a la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura S.A. (K0) hasta La Bocana entre Punta Bazán y Punta Soldado (K14-K15 aproximadamente); en este sector las corrientes siguen el alineamiento del canal y los oleajes son de pequeña amplitud.

Los siguientes 15.5 Km están en mar abierto, o bahía exterior, desde la Bocana (K15) hasta el K30+500 donde se presentan oleajes de mayor amplitud, hay corrientes cruzadas y vientos de costado.

El dragado de profundización que se efectúa en el canal actual es de 12.50 m en la bahía interior y de 13.50 m en la bahía exterior. El canal esta adecuadamente señalizado con normas de navegación marítima internacionales, tiene faros de aproximación y boyas luminosas.

El ancho de la base del canal es de 160 m en la bahía interior y 200 m en la bahía exterior. La profundidad en la bahía exterior debe ser como mínimo de un metro mayor que en la bahía interior, debido a las necesidades de márgenes adicionales por oleaje, corrientes y vientos que son más notorios en ese sector que en la bahía interior (HNV Consultoria ; CONCEP S.A.S, 2016).

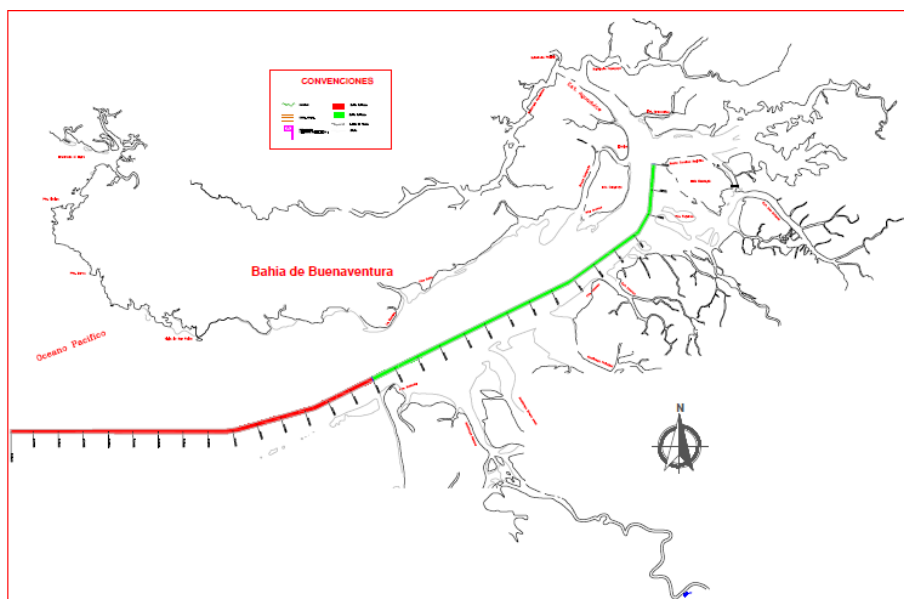


Figura 4 Bahía de Buenaventura y su canal de acceso, En verde Bahía Interior, En rojo Bahía Exterior

8.1.2 ASPECTOS HIDROMETEREOLÓGICOS

La información de los aspectos hidrometeorológicos corresponde a los registros de las estaciones Aeropuerto de Buenaventura y Colpuertos del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). En la Tabla 1 se presentan las coordenadas y altura de la ubicación de las estaciones.



Figura 5 Localización estaciones del IDEAM. Fuente IDEAM 2017.

ESTACIÓN IDEAM	COORDENADAS	ALTURA (m.s.n.m)
Aeropuerto de Buenaventura	3°49'0.00"N - 76°59'0.00"O	14
Colpuertos	3°53'0.00"N - 77°4'0.00"O	10

Tabla 1 Coordenadas y altura de la ubicación de las estaciones del IDEAM. Fuente IDEAM 2017.

8.1.2.1 Temperatura

8.1.2.2 Temperatura del aire

El municipio de Buenaventura al encontrarse localizado en la parte baja de la cordillera occidental y su baja altura absoluta pertenece al piso térmico cálido. Las variaciones de la temperatura durante el año son mínimas debido al alto contenido de vapor de agua en la atmósfera.

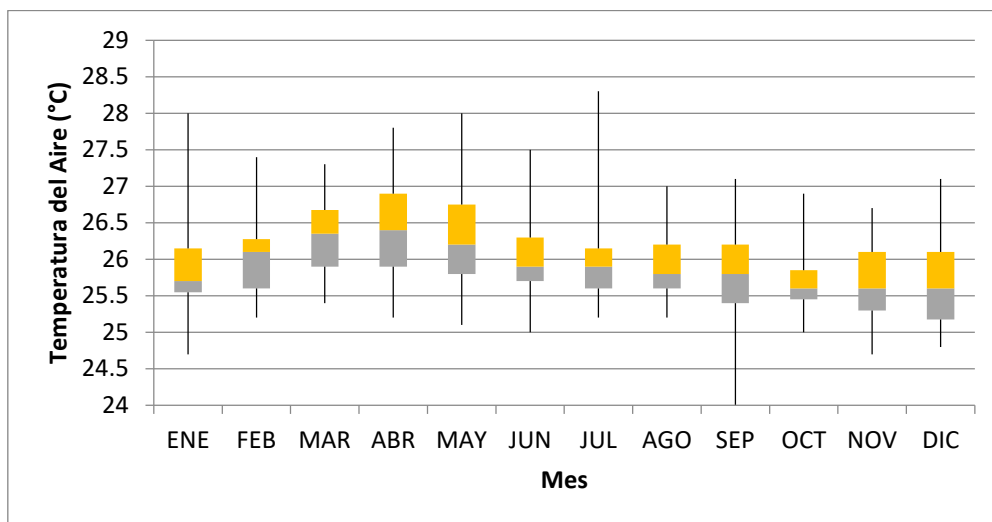


Figura 6 Diagrama de cajas y alambres de la temperatura del aire Estación Aeropuerto, periodo 1962-2014. Fuente IDEAM 2016

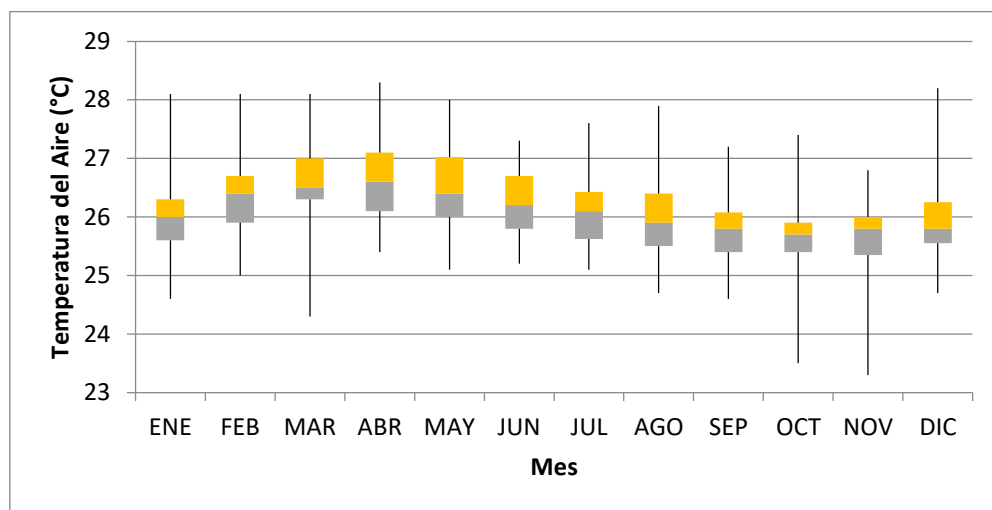


Figura 7 Diagrama de cajas y alambres de la temperatura del aire Estación Colpuertos, periodo 1969-2000. Fuente IDEAM 2016

En la Figuras 6 se puede apreciar que la temperatura del aire máxima registrada para los datos históricos de la estación Aeropuerto fue en el mes de julio, pero los meses de marzo, abril y mayo el 50% de los datos se encuentra entre 25° y 27°C, siendo los más calurosos; la mínima temperatura registrada se presentó en el mes de septiembre. Para la estación Colpuertos en la Figura 7 se tiene que los meses de marzo, abril y mayo son los que presentaron mayores temperaturas; la máxima tempera se registró en el mes de abril y la mínima en el mes de noviembre.

TEMPERATURA DEL AIRE MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (°C)														
ESTACIÓN	AÑOS	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M. ANUAL
AEROPUERTO	1962-2014	25.9	26.0	26.3	26.4	26.2	26.0	26.0	25.9	25.8	25.7	25.7	25.7	26.0
COLPUERTOS	1969-2000	26.0	26.4	26.6	26.6	26.5	26.2	26.1	25.9	25.8	25.6	25.6	25.9	26.1

Tabla 2 Temperatura del aire media mensual multianual. Fuente IDEAM 2016.

Teniendo en cuenta los registros tomados por las diferentes estaciones, se determina que el la temperatura promedio mensual de la Bahía de Buenaventura es de 26°C, la cual corresponde a un clima cálido.

8.1.2.3 Temperatura superficial del mar

La temperatura del mar sirve como base para entender y describir el comportamiento de las masas de agua que circulan en la bahía.

En la bahía de Buenaventura la temperatura superficial del agua, según el informe de Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de las Aguas Costeras del Caribe y Pacífico Colombianos del 2015 oscila entre 29.1 y 31.5 °C en ambos instantes de marea (INVEMAR, 2015).

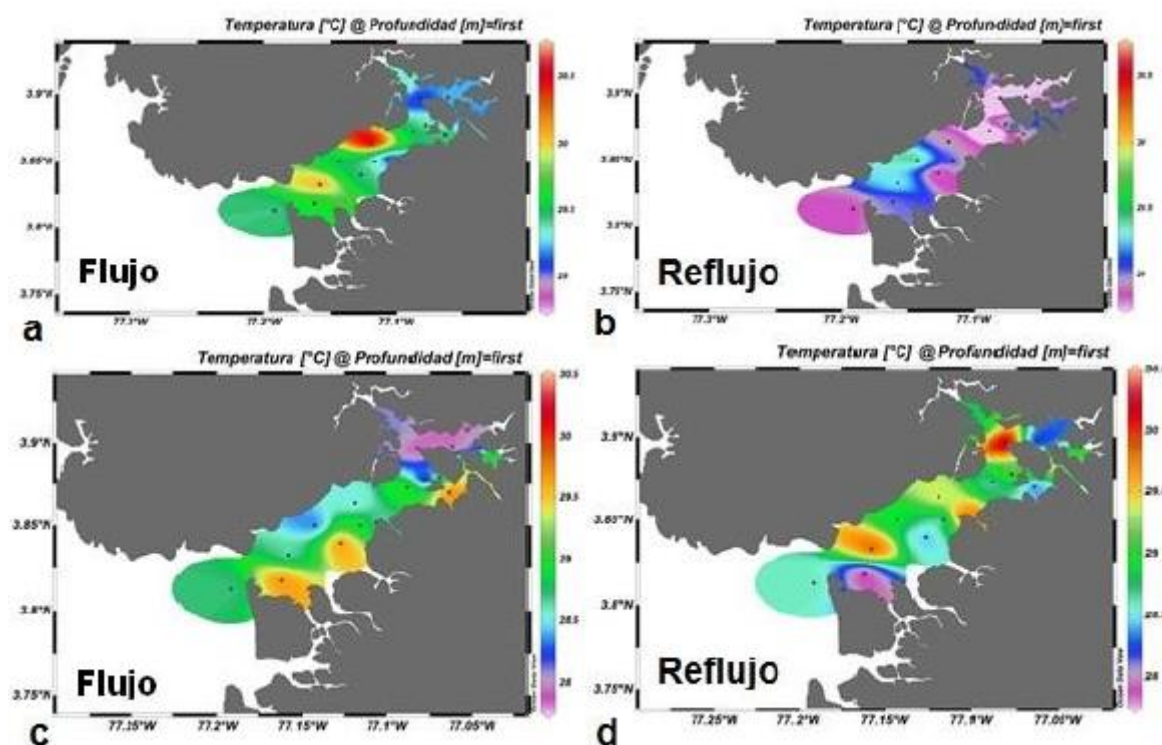


Figura 8 Temperatura de la superficie de mar en la Bahía de Buenaventura. Fuente INVEMAR 2015

Teniendo en cuenta la Figura 8 se puede observar como varia la temperatura en la Bahía de Buenaventura para los dos instantes de marea flujo y reflujo en dos tiempos diferentes de precipitaciones altas (a,b) y bajas (c,d). En altas precipitaciones se obtuvieron valores de 30.4 °C y 27.8 °C para el flujo y reflujo respetivamente y en bajas precipitaciones los valores fueron de 31.5 °C y 29.9 °C para las dos condiciones de marea.

8.1.2.4 Humedad relativa

La humedad relativa se define como la razón entre la humedad absoluta y la cantidad máxima de agua que admite el aire por unidad de volumen; en otras palabras, la humedad relativa expresa la cantidad máxima de vapor que puede tener el aire a una temperatura determinada.

La baja salinidad del mar en la Costa Pacífica Colombiana, originada por el alto volumen de agua dulce que descargan los ríos en el Litoral, la evapotranspiración de los manglares y selvas de la costa, el estancamiento de las masas de nieves arrastradas por los vientos marítimos por la presencia de la cordillera occidental, son las principales causantes del sostenimiento de una alta humedad atmosférica a lo largo del año en la bahía de Buenaventura (Universidad del Valle, 1997).

La humedad relativa de la Bahía de Buenaventura ha sido registrada durante largos periodos en las estaciones Colpuertos y Aeropuerto de Buenaventura; en las Figuras 9 y 10 se presentan las variaciones de humedad relativa y en la Tabla 3 la media mensual multianual de humedad:

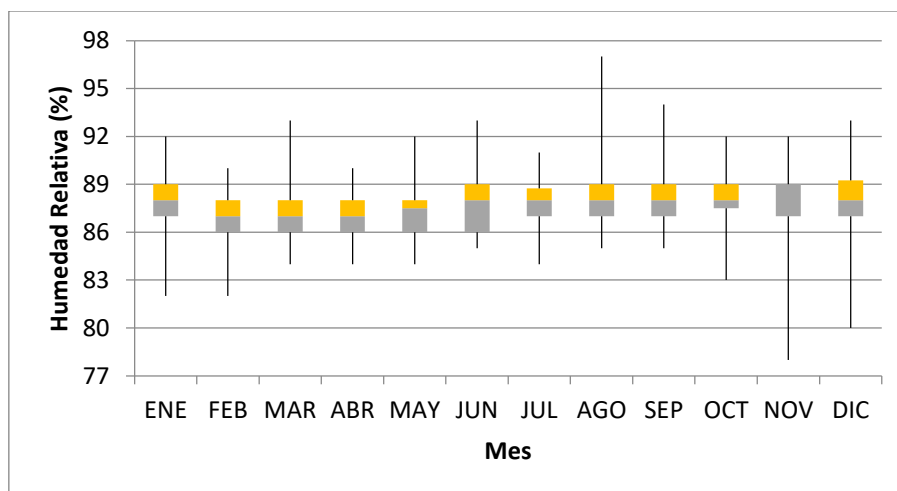


Figura 9 Diagrama de cajas y alambres para la Humedad Relativa en la Estación Aeropuerto, periodo 1962-2014. Fuente IDEAM 2016.

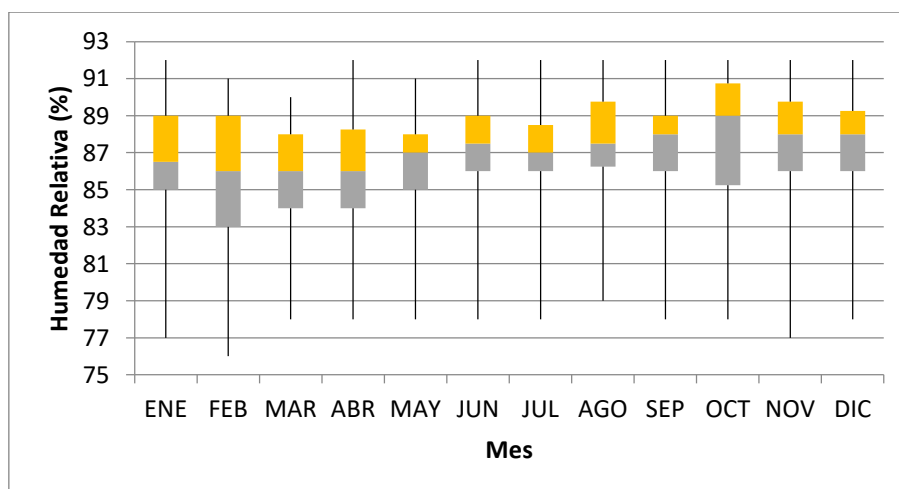


Figura 10 Diagrama de cajas y alambres para la Humedad Relativa en la Estación Colpuertos periodo 1969-2000. Fuente IDEAM 2016.

Teniendo en cuenta las Figuras 9 y 10 se puede observar que los registros históricos en la estación Aeropuerto presentan una tendencia a la uniformidad, ya que el 50% de sus valores se encuentra entre 86% y 89% de humedad relativa para cada mes; el valor máximo registrado en la estación se presentó en el mes de agosto y el mínimo en el mes de noviembre.

Para la estación Colpuertos se presentó una mayor dispersión en sus datos teniendo en cuenta que sus valores mínimos y máximos y el 50 % se encuentran alejados uno de otro.

HUMEDAD RELATIVA MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (%)														
ESTACIÓN	AÑOS	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M. ANUAL
AEROPUERTO	1962-2014	87.8	87.2	87.1	86.8	87.3	87.7	87.5	88.3	88.1	88.3	88.0	87.9	87.8
COLPUERTOS	1969-2000	86.5	85.6	85.6	85.9	86.2	87.0	86.4	87.2	87.0	87.5	87.3	87.3	86.6

Tabla 3 Humedad relativa. Fuente IDEAM 2016.

Teniendo en cuenta la Tabla 3, el régimen de humedad durante el año muy homogéneo tanto para la estación del Aeropuerto de Buenaventura con valores que oscilan entre 85 y 87%, como para la estación Colpuertos entre 86 y 88%, manteniendo el promedio anual entre 86 y 87% en toda la Bahía.

8.1.2.5 Precipitación

Los periodos de lluvias en la bahía de Buenaventura son muy fuertes y marcados; esto se debe principalmente al desplazamiento de Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). De igual manera, a las masas de nubes que se forman a poca altura sobre el mar, saturadas de humedad, que son arrastradas por los fuertes vientos del occidente hacia el interior, y al encontrarse con la cordillera occidental se detienen, se enfrían sobre las estribaciones de esta y se condensan, precipitando lluvias abundantes (HNV Consultoria ; CONCEP S.A.S, 2016).

Para caracterizar el comportamiento pluvial de Buenaventura se realizara el análisis de la información climatológica que se encuentra en los registros históricos de las estaciones Aeropuerto de Buenaventura y Colpuertos (ver Figuras 11 a 14 y Tablas 4 y 5).

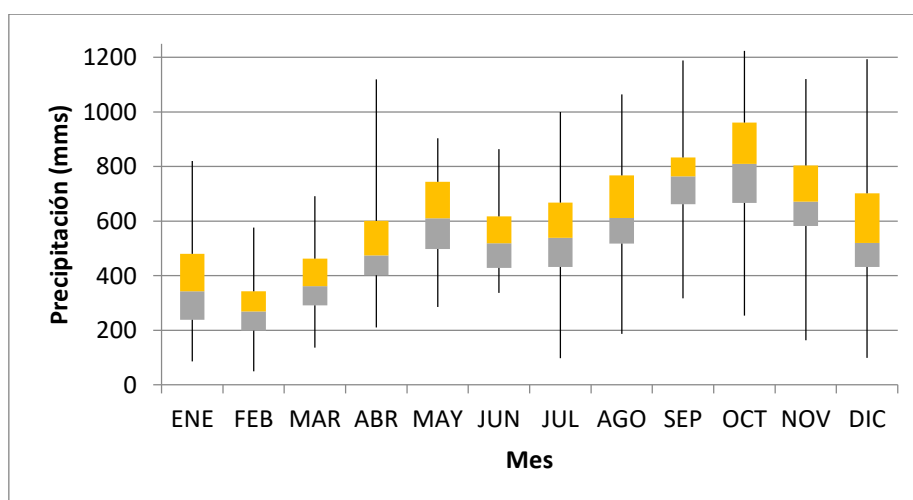


Figura 11 Diagrama de cajas y alambres para la Precipitación Estación Aeropuerto, periodo 1946-2016 .Fuente IDEAM 2016.

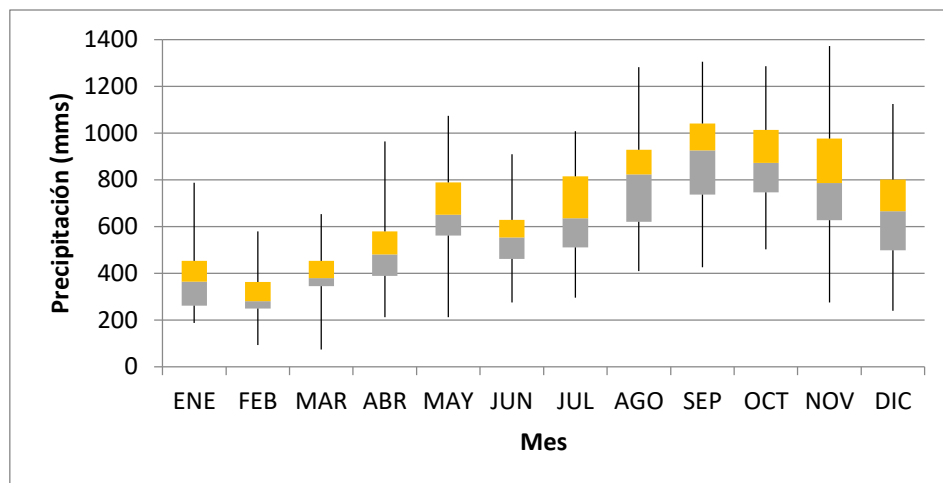


Figura 12 Diagrama de cajas y alambres para la Precipitación Estación Colpuertos, periodo 1969-2001. Fuente IDEAM 2016.

En las Figuras 11 y 12 para la estación Aeropuerto y Colpuertos se observa que los meses de mayor precipitación son septiembre, octubre y noviembre y los meses de menor precipitación son enero, febrero y marzo. La precipitación máxima registrada en la estación Aeropuerto ocurrió en el mes de noviembre con un valor mayor a los 1200 mm y para la estación Colpuertos en el mes de noviembre con un valor cercano a los 1400 mm.

Los valores mínimos registrados en la estación Aeropuerto y Colpuertos se presentaron en el mes de febrero y febrero, marzo, respectivamente.

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (mms)														
ESTACIÓN	AÑOS	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M. AN.
AEROPUERTO	1946-2016	357.8	275.7	369.6	501.7	617.5	529.2	546.9	638.1	751.6	807.4	683.1	567.3	6646.0
COLPUERTOS	1969-2001	389.4	302.1	389.8	514.2	665.1	563.9	658.9	804.4	891.9	881.2	803.1	648.6	7512.6

Tabla 4 Precipitación. Fuente IDEAM 2016.

Según los valores medios mensuales multianuales de las estaciones, la Bahía de Buenaventura presenta un promedio de lluvia anual que oscila entre 6646 mm/año y 7512.6 mm/año.

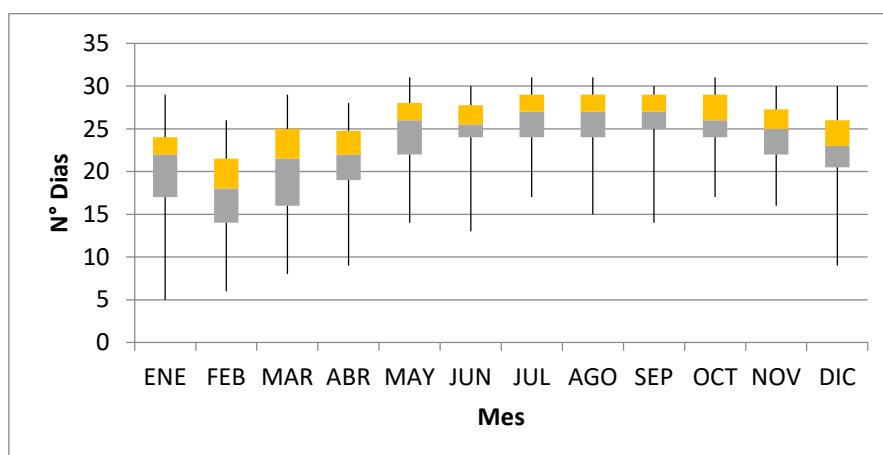


Figura 13 Diagrama de cajas y alambres del Número de Días de precipitación mensual, Estación Aeropuerto, periodo 1946-2016. Fuente IDEAM 2016.

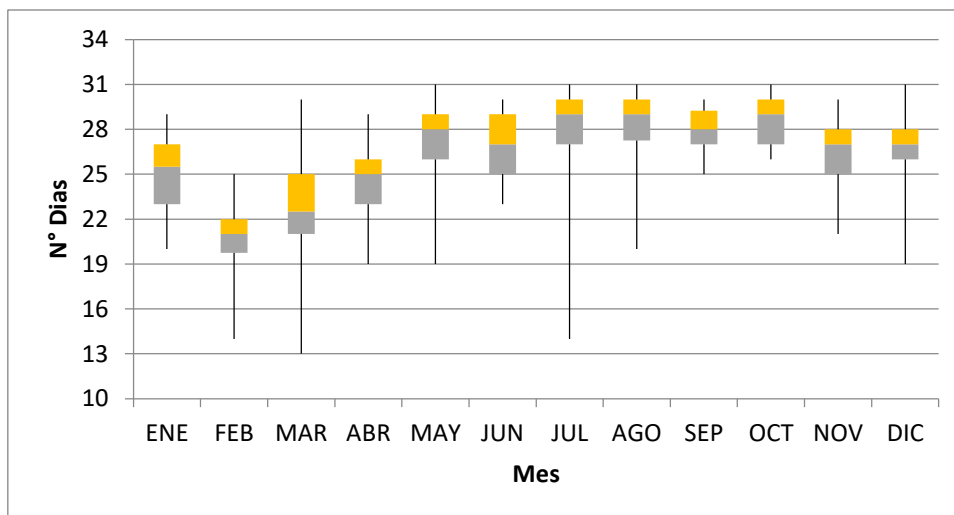


Figura 14 Diagrama de cajas y alambres del Número de Días de precipitación mensual, Estación Colpuertos, periodo 1969-2001. Fuente IDEAM 2016.

De las Figuras 13 y 14 se puede observar que los días de precipitación tienden a un comportamiento semestral, presentando para el segundo semestre del año una mayor cantidad de días de precipitación.

DIAS DE PRECIPITACIÓN MEDIOS MENSUAL MULTIANUAL (DIAS)														
ESTACIÓN	AÑOS	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M. AN.
AEROPUERTO	1946-2016	21	17	20	22	25	24	26	26	26	26	24	23	23
COLPUERTOS	1969-2001	25	21	23	25	27	27	28	28	28	29	26	26	26

Tabla 5 Días de Precipitación. Fuente IDEAM 2016.

Por último, como se puede observar en la Tabla 5, que en Buenaventura llueve en promedio entre 23 a 26 días del mes.

8.1.2.6 Vientos

La influencia de la acción del viento afecta directamente el movimiento de la superficie del agua creando un oleaje fuerte o moderado dependiendo de la intensidad y la dirección del viento, además de esto origina un desnivel en la superficie libre del agua.

La dirección, frecuencia e intensidad del viento son parámetros determinantes en las predicciones de oleaje, el cual incide de manera importante en la dinámica de las masas de agua y en la morfología costera. En las Figuras 15 y 16 y Tabla 6 se indican los valores correspondientes a los registros de velocidad del viento en las estaciones Aeropuerto y Colpuertos.

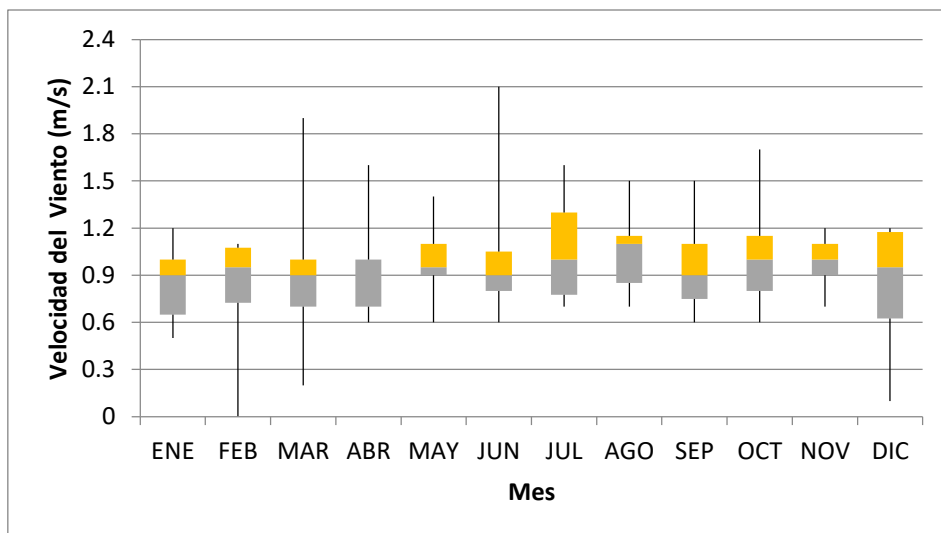


Figura 15 Diagrama de cajas y alambres para la Velocidad del Viento registros Estación Aeropuerto, periodo 1978-2012. Fuente IDEAM 2016.

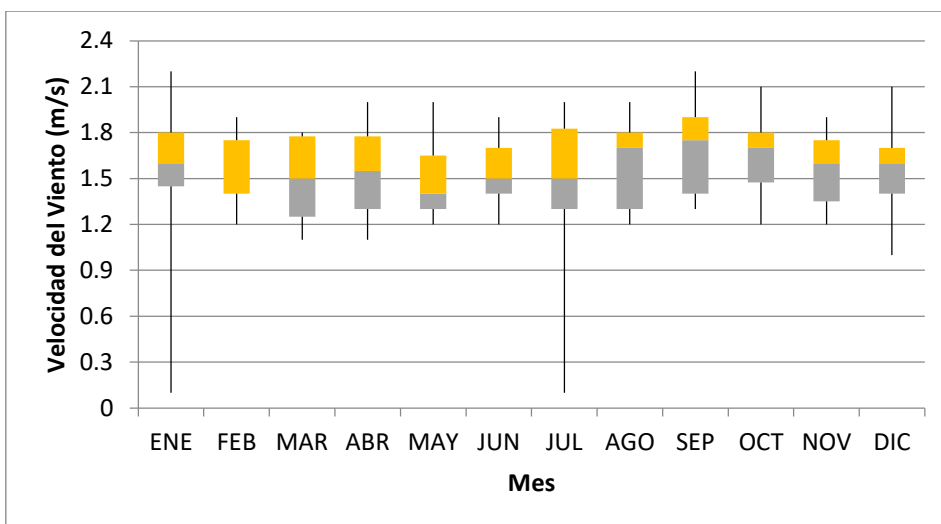


Figura 16 Diagrama de cajas y alambres para la Velocidad del Viento registros Estación Colpuertos, periodo 1982-2001. Fuente IDEAM 2016.

Los registros históricos en las estaciones Aeropuerto y Colpuertos, muestran que la velocidad del viento en la estación Colpuertos es mayor en cada uno de los meses en comparación con la estación Aeropuerto, esto se debe cercanía de la estación Colpuertos con la bahía.

El valor mínimo registrado de velocidad del viento en la estación Aeropuerto pertenece al mes de febrero. En la estación Colpuertos el 50% de los valores de cada mes se encuentra entre 1,2 y 1,8 m/s, observándose también una poca dispersión en los datos.

VELOCIDAD DEL VIENTO MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (m/s)														
ESTACIÓN	AÑOS	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M. ANL
AEROPUERTO	1978-2012	0.86	0.84	0.90	0.96	0.98	0.99	1.06	1.05	0.95	1.03	0.97	0.84	0.95
COLPUERTOS	1982-2001	1.55	1.54	1.50	1.53	1.49	1.54	1.45	1.62	1.70	1.65	1.57	1.55	1.56

Tabla 6 Velocidad del Viento. Fuente IDEAM 2016.

Teniendo en cuenta los datos registrados en la estaciones Aeropuerto de Buenaventura y Colpuertos, se puede determinar que la velocidad media del viento oscila entre 1 y 1.6 m/s.

En la Figura 17 se observan las rosas de los vientos correspondientes a las estaciones Aeropuerto de Buenaventura y Colpuertos respectivamente, en las cuales se puede identificar la dirección predominante de los vientos y la frecuencia relativa de estos.

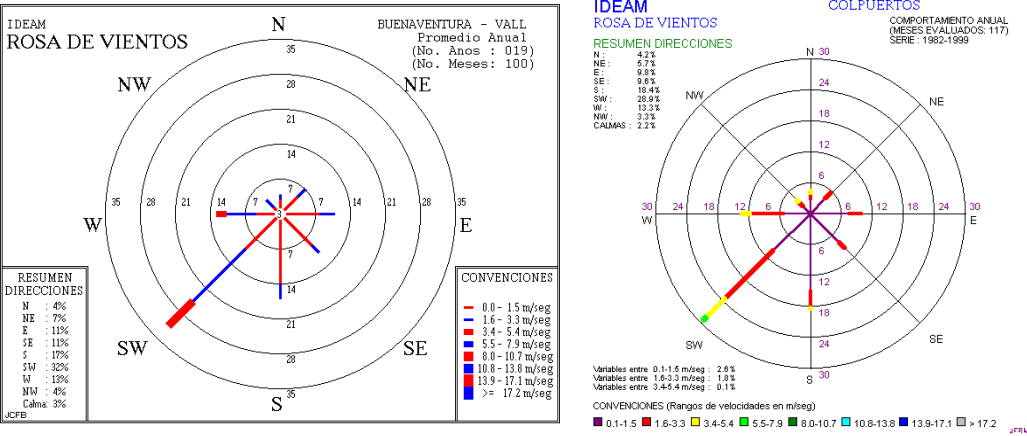


Figura 17 Rosa de Viento de estación Aeropuerto de Buenaventura y Colpuertos respectivamente. Fuente IDEAM.

ESTACIÓN AEROPUERTO	
DIRECCION	FRECUENCIA RELATIVA (%)
E	11
NE	7
N	4
NW	4
W	13
SW	32
S	17
SE	11
Calma	3

Tabla 7 Dirección y frecuencia relativa del viento estación Aeropuerto de Buenaventura. Fuente IDEAM.

La estación Aeropuerto de Buenaventura nos muestra que la dirección predominante de donde provienen los vientos es SW (Sur-Oeste), con una frecuencia relativa de 32% (ver Tabla 7)

ESTACIÓN COLPUERTOS	
DIRECCION	FRECUENCIA RELATIVA (%)
E	9.8
NE	5.7
N	4.2
NW	3.3
W	13.3
SW	28.9
S	18.4
SE	9.6
Calma	2.2
Viento Variable (VRB)	4.5

Tabla 8 Dirección y frecuencia relativa del viento estación Colpuertos. Fuente IDEAM.

La estación Colpuertos nos muestra que la dirección predominante de donde provienen los vientos al igual que para la estación Aeropuerto de Buenaventura es la SW (Sur-Oeste), esta vez con una frecuencia relativa de 28.9%.

8.1.2.7 Nubosidad

Las nubes de la región reflejan al ambiente una gran cantidad de radiación solar incidente, esta cantidad depende básicamente del tipo de nubes y su albedo (HNV Consultoria ; CONCEP S.A.S, 2016). En la Figura 18 se presenta la nubosidad media mensual multianual en las estaciones Aeropuerto y Colpuertos. Se observa que la nubosidad media en la estación Aeropuerto es alrededor de 0.9 octas mayor en la estación Colpuertos.

Según los registros, el valor medio anual de nubosidad oscila entre 7 y 6 octas durante todo el año, lo cual permite concluir que la ciudad de Buenaventura permanece cubierta, o semicubierta de nubes durante todo el año.

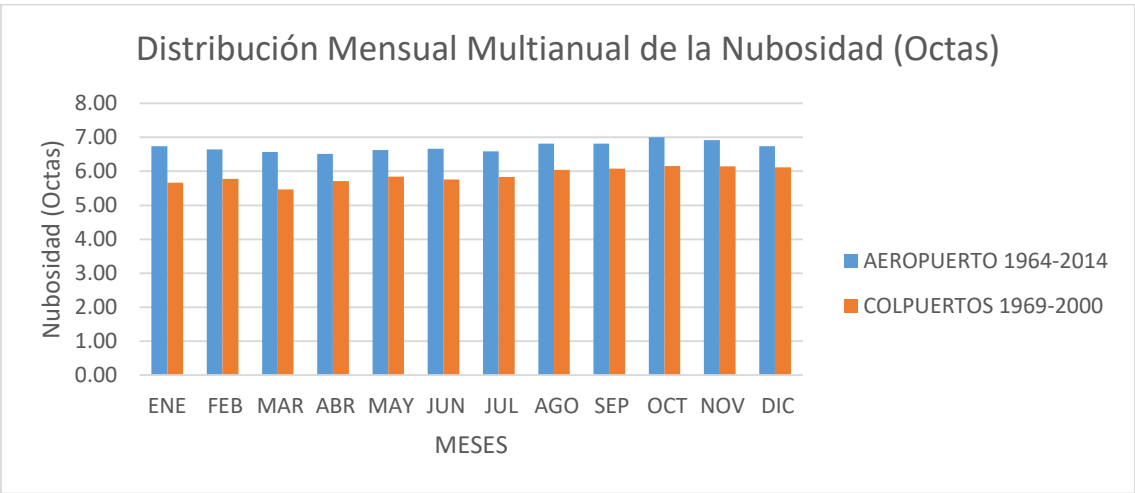


Figura 18 Nubosidad media mensual multianual de las estaciones del IDEAM. Fuente IDEAM 2016.

NUBOSIDAD MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (Octas)														
ESTACIÓN	AÑOS	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M. ANL
AEROPUERTO	1964-2014	6.74	6.64	6.57	6.51	6.62	6.67	6.59	6.81	6.82	7.00	6.92	6.74	7
COLPUERTOS	1969-2000	5.67	5.78	5.46	5.71	5.85	5.76	5.83	6.04	6.08	6.15	6.15	6.12	6

Tabla 9 Nubosidad media. Fuente IDEAM 2016.

8.1.2.8 Brillo solar

En las Figuras 19 y 20 se presentan los diagramas de cajas y alambres del brillo solar en las estaciones Aeropuerto y Colpuertos, respectivamente.

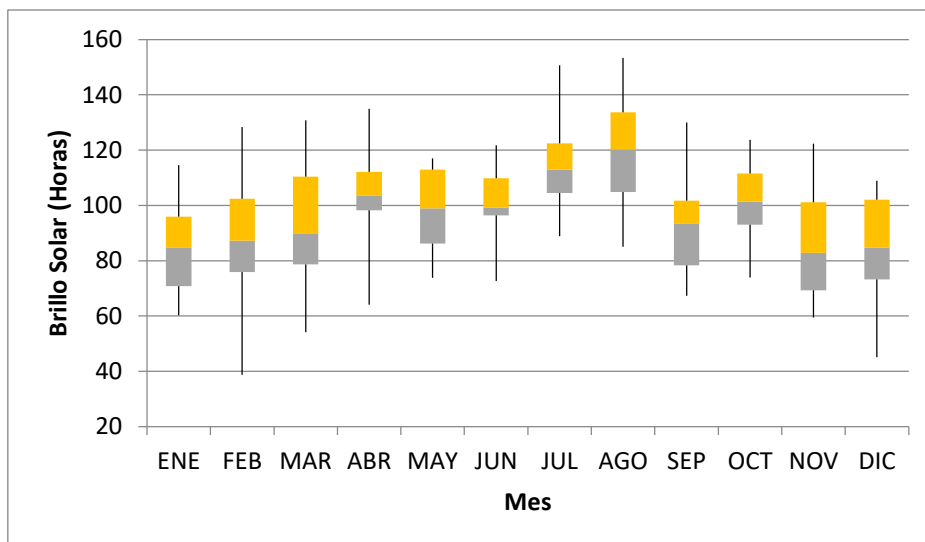


Figura 19 Diagramas de cajas y alambres. Brillo Solar registros Estación Aeropuerto, periodo 1975-2014. Fuente IDEAM 2016.

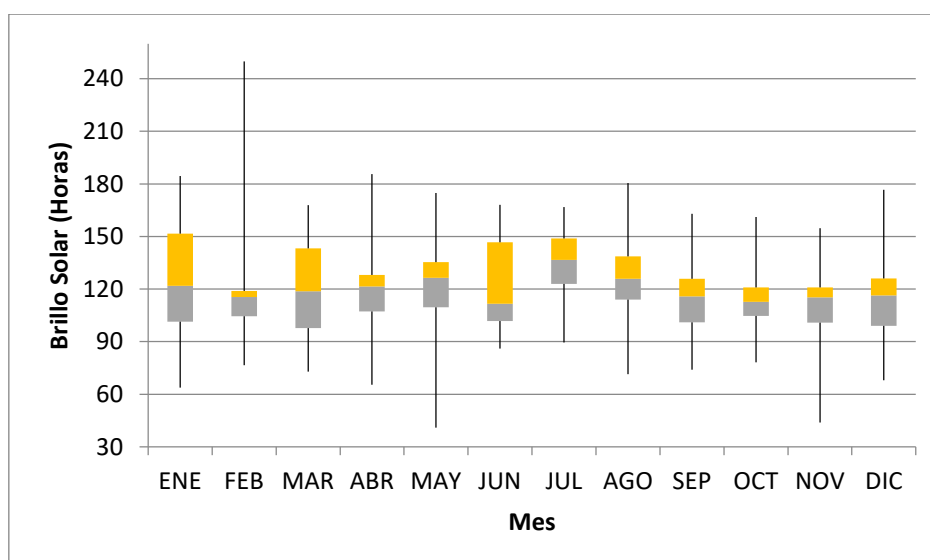


Figura 20 Diagramas de cajas y alambres. Brillo Solar registros Estación Colpuertos, periodo 1969-2001. Fuente IDEAM 2016.

En las Figuras 19 y 20 se puede observar que en la estación Aeropuerto el valor máximo se registró en el mes de agosto, por el contrario en el mes de febrero se registró el valor mínimo de brillo solar. Los valores en la estación Colpuertos en el mes de febrero presentan una concentración de sus datos entre 90 y 120 horas de brillo solar, a su vez en este mes se presenta el valor máximo el cual es superior a 240 horas y el valor mínimo se registró en el mes de mayo con un valor cercano a las 30 horas. Para los otros meses del año en la estación Colpuertos el 50 % de sus datos se concentra entre 90 y 150 horas de brillo solar.

BRILLO SOLAR MEDIO MENSUAL MULTIANUAL (Horas)														
ESTACIÓN	AÑOS	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	M. ANUAL
AEROPUERTO	1975-2014	84.0	87.6	94.7	104.0	98.8	100.4	116.1	119.2	91.8	101.1	85.8	85.0	1168.7
COLPUERTOS	1969-2001	125.3	118.8	120.7	117.6	122.2	122.6	134.6	125.9	115.4	112.4	112.6	113.9	1442.1

Tabla 10 Brillo Solar. Fuente IDEAM 2016.

De acuerdo a los valores mensuales registrados en las estaciones, se observa que en la estación Colpuertos la duración en horas de brillo solar son mayores que las registradas en la estación Aeropuerto. La duración media anual en la estación Aeropuerto es de 1168.7 horas y la estación Colpuertos es de 1442.1 horas.

8.1.2.9 Salinidad

En los estuarios se presenta la interacción de dos prismas o volúmenes de agua: El prisma mareal de agua salada y el prisma de agua dulce proveniente de los ríos tributarios. De acuerdo con las densidades y volúmenes de cada uno de estos prismas de agua, se puede presentar o no la mezcla de ellos. Cuando se da la mezcla total se le llama estuario bien mezclado, si es parcial se denomina estuario parcialmente mezclado y si no existe mezcla se llama estuario estratificado.

Dependiendo del grado de mezcla de los volúmenes de agua, se tendrán diferencias en las características de las corrientes de agua (magnitud, distribución y duración).

La Bahía de Buenaventura es considerada como un estuario bien mezclado, ya que presenta la interacción de los prismas mareales de agua salada y agua dulce proveniente de los ríos tributarios, entendiéndose por prisma mareal la diferencia de volúmenes de agua almacenados en la Bahía durante pleamar y bajamar (INVEMAR, 2003).

Teniendo en cuenta las mediciones realizadas para el “Estudio y Diseño de Dragado de Profundización del Canal de Acceso al Puerto de Buenaventura” desarrollado por HMV Consultoría y CONCEP S.A.S en el año 2015; los valores de salinidad en la Bahía están en el orden de 10.73 a 27.6 UPS (Unidades Prácticas de Salinidad), por lo que se considera agua salobre y en general, la salinidad disminuye a medida que se ingresa a la Bahía. Se tienen diferencias de salinidad en la columna de aguas menores a 10 UPS; por lo tanto, no se detectó estratificación entre las masas de agua dulce y del océano.

8.1.3 ASPECTOS FLUVIALES

8.1.3.1 Cuenca hidrográfica

La cuenca de la bahía de Buenaventura tiene una extensión de 2956.10 km². Las áreas de las sub-cuencas de los ríos y estero que tributan a la bahía se presentan en la Tabla 11.

CUENCA	ÁREA (Km ²)
RÍO DAGUA	1639
RÍO ANCHICAYÁ	1200
ESTERO AGUADULCE	730
ESTERO SAN JOAQUIN	78.9
ESTEROS SAN ANTONIO Y HONDO	34
ESTERO GAMBOA	31.3
ESTERO PICHIDÓ	29.3
ESTERO AGUACATE	16.8

Tabla 11 Áreas de las cuencas de los ríos tributarios de la Bahía de Buenaventura. Fuente (Quiros J. & Palacios O., 2006).

8.1.3.2 Caudales fluviales

A la bahía interior de Buenaventura llegan doce tributarios entre ríos, brazos y esteros (Quiros J. & Palacios O., 2006), caudales que se indican en la Tabla 12.

RÍOS O ESTEROS	CAUDAL (m ³ /seg)		
	MÍNIMO	MEDIO	MÁXIMO
RÍO DAGUA	55,8	66,1	89,4
RÍO ANCHICAYÁ - BRAZO PPAL	48,8	98,9	604,5
RÍO ANCHICAYÁ - BRAZO SECO	26,2	53,2	325,5
RÍO ANCHICAYÁ - BRAZO HUMANE	15	30	60
ESTERO AGUADULCE	40	80	160
ESTERO GAMBOA	15	30	60
ESTERO AGUACATE	5	10	20
ESTERO SAN ANTÑO	10	20	40
ESTERO HONDO	5	10	20
ESTERO LIMONES	15	30	60
ESTERO FABIAN	10	20	40

Tabla 12 Caudales mínimos, medios y máximos registrados de los ríos y esteros tributarios de la Bahía de Buenaventura. Fuente (Quiros J. & Palacios O., 2006).

El volumen promedio que entra y sale de la Bahía es directamente proporcional a la amplitud de la marea y a las descargas de los ríos tributarios.

8.1.4 ASPECTOS OCEANOGRÁFICOS

8.1.4.1 Mareas

En la cuenca del Pacífico Colombiano, el régimen mareal es de tipo semidiurno, con dos pleamares y dos bajamares en periodos de aproximadamente 12 horas 25 minutos. El periodo correspondiente a la pleamar o subida de la marea es casi 30 minutos más largo que el periodo de bajamar o de reflujo.

Se presentan dos tipos de mareas alternados cada quince días, de acuerdo con los periodos lunares. En el primer tipo, el rango mareal es un poco más estrecho, con mareas menos altas y menos bajas. Este periodo se denomina localmente “quiebras” y corresponde a los cuartos lunares. El otro periodo mareal corresponde las épocas en las que la amplitud del rango de mareas aumenta, las mareas suben y bajan más. Estas mareas corresponden a las épocas de luna llena y nueva y se denominan localmente “pujas” (INVEMAR, 2003).

En la Bahía de Buenaventura las características de la marea son bastantes similares a las existentes en el Pacífico Colombiano, con algunas pequeñas variaciones especialmente en los valores de la amplitud mareal de la marea a medida que esta penetra en la Bahía por efectos de diferentes fenómenos, tales como, resonancia, reflexión, refracción por cambios de velocidad de la onda de área en aguas de diferentes profundidades, etc. Así pues en la entrada de la Bahía (sector Punta Soldado – Punta Bazán) se tienen amplitudes ligeramente inferiores (7 a 10% en promedio) a las que se presentan en el

sector de la isla de Buenaventura. Esto se explica debido a la reducción en la sección hidráulica del canal y a una baja resistencia al flujo (rugosidades relativamente más bajas y moderadas) (Quiros J. & Palacios O., 2006).

8.1.4.2 Mareas - Niveles de referencia

Las amplitudes de la marea en Buenaventura fluctúan, de acuerdo con los registros históricos del periodo 1971-1997, entre 1.4 metros y 5.4 metros. La amplitud media de la marea para este periodo fue de 3.165 metros.

La pleamar máxima registrada fue de 5.06 metros (año 1997) y la bajamar mínima registrada fue de -0.82 metros presentada en el año 1984.

Los registros horarios del mareógrafo del Terminal petrolero del puerto de Buenaventura permiten estimar el nivel medio del mar, el nivel medio de pleamar, el nivel medio de bajamar, la amplitud media de marea, la pleamar máxima registrada y la bajamar mínima registrada.

Los niveles de mareas de la Tabla 13 están referidos al nivel medio de las bajamares más bajas de mareas vivas o nivel de Sicigia. Este nivel de referencia es el más utilizado para fines de navegación (cartas náuticas).

REFERENCIA	CONVENCION	NIVEL (m)
NIVEL MEDIO DEL MAR	MSL	2,24
NIVEL DE MAREA MEDIA	MTL	2,125
NIVEL DE PLEAMAR MEDIA	MHW	3,67
NIVEL DE BAJAMAR MEDIA	MLW	0,54
NIVEL DE PLEAMAR MEDIA SUPERIOR	MHHW	3,74
NIVEL DE BAJAMAR MEDIA INFERIOR	MLLW	0,449
AMPLITUD MEDIA DE MAREA	Mn	3,165
PLEAMAR MAXIMA REGISTRADA (AÑO 1997)		5,4
BAJAMAR MINIMA REGISTRADA (AÑO 1993)		-0,82

Tabla 13 Niveles de referencia. Fuente (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

8.1.4.3 Corrientes

Las corrientes marinas y oceánicas poseen unas características de dirección y magnitud que son el resultado de la interacción de factores meteorológicos, hidrológicos, geológicos y topográficos de una determinada zona de influencia y de las condiciones particulares de la región.

El Pacífico Colombiano está influenciado por las corrientes del Perú y de Humboldt, que se desprenden de la costa a partir de Cabo Blanco (4° S) y tienen influencia normalmente hasta los 17° S.

Las corrientes superficiales que afectan al Pacífico Colombiano son la Corriente Ecuatorial Norte que se forma en la Bahía de Panamá y se desplaza hacia el oeste a

nivel de los 12° N y la Contra-Corriente Ecuatorial del Norte que se manifiesta con mayor intensidad entre mayo y diciembre (INVEMAR, 2003).

La Corriente de Colombia recorre la costa de sur a norte hasta mezclarse con las aguas del Golfo de Panamá.

Las corrientes dentro de la Bahía de Buenaventura están influenciadas por diferentes factores como las mareas, las descargas de los ríos, los vientos, el oleaje, las lluvias y la configuración del fondo del mar y de las zonas costeras. Sin embargo, la mayor influencia en la dinámica morfológica de la Bahía de Buenaventura es ejercida por la marea y la correspondiente entrada o salida del flujo.

8.1.4.4 Marea subiendo o flujo

En términos generales se observa que el patrón de flujo cuando la marea sube, a las diferentes profundidades, es bastante similar. Las velocidades mínimas como es de esperarse se presentan en los periodos próximos a pleamares y bajamares, y en las zonas de menores profundidades.

Las velocidades máximas se presentan en los tramos estrechos y en los sectores de mayores profundidades (zona del canal), aproximadamente en el periodo comprendido entre las 2.5 y las 4.0 horas después de las bajamares y las pleamares respectivamente. La máxima velocidad que se ha medido es de 2.08 m/seg a 5 metros de profundidad en proximidad del canal de navegación frente al sector denominado Boca – Cangrejo. En promedio las velocidades máximas observadas se hallan entre 1.0 y 1.5 m/seg. Las velocidades del flujo en las zonas bajas, generalmente presentan valores menores a 0.5m/seg (Quiros J. & Palacios O., 2006).

En marea subiendo, las corrientes entran a la Bahía y avanzan siguiendo aproximadamente el alineamiento del canal de navegación, hasta llegar al sector de la Isla Cangrejo, donde el flujo se divide en dos: una buena parte se dirige hacia la zona de muelles y Estero Aguadulce y la otra fracción hacia el sur de la isla, para continuar hacia el río Dagua, esteros Hondo y El Piñal y posteriormente hacia el estero San Antonio.

8.1.4.5 Marea bajando o reflujo

Cuando la marea sale de la Bahía se observan velocidades de la corriente un poco mayores a las registradas durante la fase de marea subiendo debido a las descargas de los ríos. Las velocidades máximas fluctúan en un rango promedio de 1.3 a 1.8 m/s). La velocidad máxima observada es de 2.26 m/seg, se obtuvo en el sector aledaño al muelle turístico de la Bocana, ubicado sobre la margen izquierda en la sección de entrada de la Bahía (Quiros J. & Palacios O., 2006).

De acuerdo con el informe “Campaña de mediciones” del Laboratorio de Ensayos Hidráulicos del Ministerio de Obras Públicas y transporte (Agosto 1980), durante el reflujo, las corrientes del estero San Antonio se dirigen hacia los esteros Piñal Norte y Piñal Sur, así: al comienzo el agua se dirige en mayor proporción hacia el Piñal Sur disminuyendo gradualmente este flujo y aumentando el flujo de salida hacia el Piñal Norte.

El flujo vaciante del estero Aguacate se dirige hacia el sector de los muelles encontrándose con el flujo proveniente del estero Piñal norte.

Desde el sector de la Isla Cangrejo (sección Coco) hasta la entrada de la Bahía el flujo saliente presenta un comportamiento bastante ordenado en trayectorias más o menos paralelas al canal de navegación. El flujo vaciante del Río Dagua y el estero Hondo se dirige hacia el canal, orientándose finalmente en el mismo sentido del eje del canal hacia la entrada de la Bahía.

El flujo proveniente de los diferentes brazos del Río Anchicayá descarga casi perpendicularmente sobre el flujo principal vaciante de la Bahía.

8.1.4.6 Oleaje

El oleaje generado mar afuera de la Bahía de Buenaventura, sobre el Océano Pacífico, está determinado fundamentalmente por los vientos alisios del noreste. Como resultado, las olas presentan una variación en dirección e intensidad, y que se hallan en relación directa con el desplazamiento de los vientos de la zona de convergencia durante el año.

Los vientos del suroeste presentan la mayor frecuencia durante gran parte del año, siguiendo en importancia los vientos del oeste. Durante el periodo Enero – Marzo los vientos del norte y noreste son un poco más notorios que en el resto del año (INVEMAR, 2003).

El oleaje de alguna consideración (de 3 y más metro de altura) que eventualmente puede presentarse durante periodos muy cortos mar afuera de la Bahía de Buenaventura, al propagarse hacia la zona costera (atravesando la barra localizada al exterior de la Bahía), reducen rápidamente su altura debido a la disipación de energía por efectos de la fricción del fondo. Como resultado de esto, la altura máxima de las olas es de alrededor de 0.9m dentro de la Bahía.

Dentro de la Bahía de Buenaventura, las olas (de alturas reducidas) que se propagan hacia el interior, así como las generadas por los vientos locales pierden rápidamente altura debido a las pérdidas de energía por fricción, de tal manera que en la zona donde se localizan los diferentes Terminales Marítimos el oleaje es casi nulo.

8.1.5 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

8.1.5.1 Geología

La costa del Pacífico americano hasta Tierra del Fuego (Argentina), hace parte del cinturón de fuego del Pacífico y contribuye con un 15% del total mundial de la disipación de la energía sísmica en forma de terremotos y maremotos (Bolt, 1981).

La principal fuente de amenaza sísmica de la región Pacífico es la cercanía del continente a la zona de subducción de la placa de Naca bajo la placa Sudamericana, ubicada a unos 150 Km de la costa y que ha ocasionado grandes terremotos en el país

como lo fue el de Buenaventura 1906 y Tumaco 1979, convirtiendo a la costa en la zona de mayor amenaza sísmica del país.

Estructuralmente, la bahía de Buenaventura es una depresión orientada en dirección noreste – sureste, formada posiblemente por bloques entre fallas regionales, como las de Buenaventura, Calima, Ceibito, Pichidó, Málaga y Naya-Micay (Alcaldía del Municipio de Buenaventura, 2013).

Falla Buenaventura

La falla Buenaventura está ubicada a lo largo de la bahía y alcanza el acceso al estero Gamboa. Esta falla es la responsable de las anomalías geomorfológicas que se presentan en la zona y ha ocasionado que el bloque Sur de la Bahía se desplace hacia el Noreste y el Norte hacia el sureste en sentido sinextral.

Falla Calima y el Ceibito

El bloque Noroeste de Buenaventura, está limitado por las Fallas de Calima y El Ceibito, con dirección regional Noroeste- Sureste, que controlan la dirección del río Calima, principalmente en dos sectores, el del bajo Calima y El Ceibito. Ambas atraviesan transversalmente el río San Juan. Este bloque Noroeste se subdivide en tres sub-bloques, que corresponden de Este a Oeste a los siguientes: El levantado de Pichidó, el hundimiento de Málaga y el distal semi-levantado del Bongo, separados por las fallas de Málaga y la Sierpe.

Falla Naya-Micay

La falla Naya-Micay bordea la zona del litoral y junto con la falla de Buenaventura, parecen ser las responsables de hundimiento del bloque sur de la bahía de Buenaventura y el oeste de la costa Pacífica.

Falla Pichidó

La falla de Pichidó con dirección regional 60° Noroeste, presenta un bloque norte, que sube con relación al bloque sur. Esta falla atraviesa la península de Aguadulce que está ubicada al norte de la isla Cascajal y que se prolonga a lo largo del estero Pichidó. En el área cercana a esta falla se ubica el proyecto portuario Complejo Industrial de Aguadulce.

8.1.5.2 Geomorfología

Las características físicas de la Bahía de Buenaventura están influenciadas por un número de factores como son el aporte fluvial con sus descargas de sedimentos, el rango mareal y el oleaje, constituyéndose en agentes primarios para la configuración de las diversas formas costeras.

En términos generales la Bahía de Buenaventura está conformada por colinas y llanuras fluviales costeras. Las colinas están constituidas por sedimentos provenientes de la erosión de la Cordillera Occidental y depositados en un ambiente litoral o continental, recibiendo adicionalmente aportes considerables de material de origen volcánico

relacionado con las erosiones que ocurrieron durante el Plio-Pleistoceno. Las llanuras fluviales y costeras constituyen la parte continental de una cuenca sedimentaria en subsidencia, en donde se acumulan sedimentos marinos, fluvio-deltaico y aluviales. De acuerdo a esto existe un predominio de costas acantiladas hacia el norte, costas baja con concentraciones de sedimentos finos y manglares al sur de Buenaventura. Las dos costas de Buenaventura presentan una diferenciación morfológica bien marcada; con la costa sur más estable comparada con la costa norte la cual parece ser parcialmente emergida o levantada tectónicamente en época reciente (Quiros J. & Palacios O., 2006).

La morfología de doble flecha de Punta Soldado y las Bocanas Anchicayá y Raposo muestran la poca influencia de la deriva litoral en la región y el posible reciclaje de sedimentos entre las bocanas y los cordones litorales por medio de las corrientes de refluo y flujo. A su vez la presencia de acantilados en el golfo de Tortugas señala la ausencia de una deriva litoral importante y la poca posibilidad de aporte de sedimentos desde los deltas de los ríos Cajambre y Yurumanguí localizados al sur.

8.1.5.3 Sedimentología

En el estuario de la Bahía de Buenaventura se presenta una combinación del modo de transporte litoral y del modo de transporte fluvial, pero el principal mecanismo del transporte de sedimentos es el ciclo mareal. Debido a que el fenómeno de oleaje poco afecta en la bahía interior y no se han hecho estudios acerca del modo de transporte por corrientes marinas, se contempla únicamente los sedimentos en suspensión y de fondo.

La dinámica de los sedimentos es influenciada por las descargas de los ríos y esteros (en menor proporción) y otros factores como salinidad, temperatura y floculación. El material orgánico propicia la floculación de las partículas cohesivas finas en suspensión.

La Universidad del Valle realizó muestreos de sedimentos para determinar las características granulométricas del material de fondo de la bahía (Universidad del Valle, 1998). Los resultados indican que el fondo de la bahía consiste principalmente de arenas finas (0.125 – 0.250 mm), arenas medias (0.25 – 0.50 mm) y material cohesivo muy fino (limos y arcillas, diámetro menor de 0.074 mm).

El material fino encontrado predomina en el sector de los muelles del Terminal Marítimo, en toda el área alrededor de la isla de Buenaventura, los tramos finales de los esteros Gamboa, Aguacate, Aguadulce, los deltas de los ríos Dagua y Humané (Brazo del río Anchicayá), y la margen norte costera del primer sector de la bahía (entre La Bocana y el estero Santa Delicia).

Las arenas finas y medias (0.125 a 0.50 mm) predominan en el sector Isla Cangrejo. Las arenas gruesas (0.5 – 2.0 mm), gravas (2.0 – 64.0 mm) y piedras (64.0 -256.0 mm) se hallan en menores proporciones a lo largo del canal de acceso desde la entrada de la bahía hasta el sector suroccidental de la isla de Buenaventura. Roca suelta dispersa (lodolitas, 250.0 – 400.0 mm) se han encontrado en el canal de navegación en los tramos comprendidos entre las abscisas K4 + 000 – K5 + 000 (al interior de la bahía), y K17 + 000 – K18 + 000 (exterior de la bahía, sector de La Bocana). En síntesis, el material más fino se encuentra en las áreas de planicie mareal, en los sectores de confluencia de los ríos y esteros y en las zonas de velocidades del flujo más bajas. El

material más grueso se halla en los sectores de los canales principales y más profundos, en los cuales las corrientes son más intensas.

Por otra parte, la concentración de los sedimentos en suspensión varía sobre toda la extensión de la bahía. Dependiendo del tipo de marea y el instante de la marea en que las muestras son recolectadas.

Los estudios adelantados por la Universidad del Valle indican que en general las concentraciones presentan valores medios y bajos, con una distribución vertical algo uniforme, con concentraciones ligeramente mayores cerca al fondo. La mayor parte de las muestras analizadas presentaron concentraciones inferiores a 100 mg/l (ó ppm, partes por millón). En las dársenas de atraque de los muelles del Terminal Marítimo las concentraciones medidas fluctuaron entre 60 y 100 mg/l, en contraste con el sector del Muelle Petrolero que arrojó concentraciones del orden de 250 mg/l. De todo el programa de mediciones realizado, solo unas pocas muestras presentaron valores de concentraciones entre 100 mg/l y 200 mg/l y unas muy pocas concentraciones entre 200 y 400 mg/l. Las máximas concentraciones fueron halladas en los siguientes sectores: entrada de la bahía, principalmente cerca a la costa en La Bocana y Punta Soldado (100 a 200 mg/l); Punta Guida – Sector Norte de la bahía después de La Bocana (150 a 400 mg/l); y, algunos tramos del canal del acceso (100 a 250 mg/l).

De los resultados obtenidos se observó que en general las concentraciones durante el flujo de la marea (o marea entrando) son mayores que las concentraciones durante el refluo de la misma, indicando muy posiblemente una mayor tasa de sedimentación durante los periodos próximos a pleamar, periodos de velocidades mínimas que presentan una mayor duración.

8.2 IMPLEMENTACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

8.2.1 SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE MALLA, INTERVALO DE TIEMPO Y ORIENTACIÓN DE LA MALLA

El área de la bahía se esquematiza mediante una malla cuadrada o rectangular uniforme, para lo cual se definió el área a modelar. Este proceso está relacionado con la localización de las fronteras abiertas y cerradas. Las fronteras cerradas coinciden con la línea de costa.

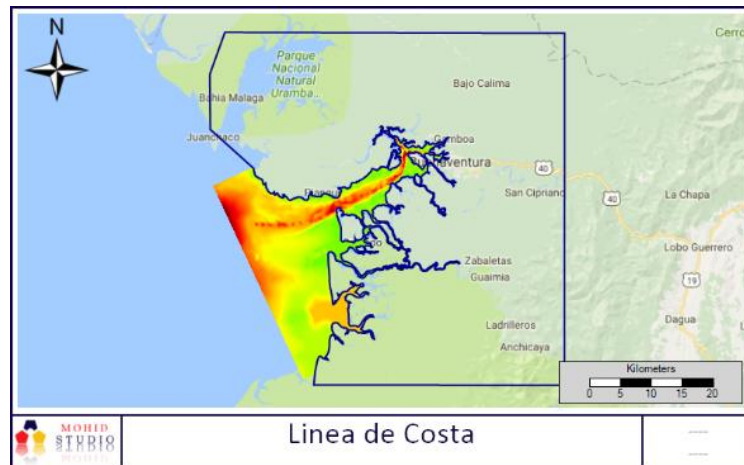


Figura 21 Línea de costa que delimita la Bahía

Para la selección del tamaño de la malla se evaluaron 3 alternativas de celdas cuadradas de 50, 60 y 100 m. La elección se definió partiendo del grado de detalle que se requería para describir los campos de flujo y los diferentes procesos físicos, al igual que el tiempo de cálculo; en principio los tres tamaños de celdas de la malla computacional se pueden considerar apropiados para representar la batimetría de la bahía y describir los procesos hidrodinámicos y de transporte al interior de la bahía, aunque es claro que entre menor sea el tamaño de las celdas mayor será el tiempo computacional de las simulaciones. Finalmente se seleccionó la malla con celdas de 50mx50m debido a que esta permite representar con suficiente aproximación la morfología de los ríos tributarios; por el contrario, con los otros dos tamaños de celdas se presentaban problemas al representar las irregularidades en la morfología de los tributarios, ocurriendo a veces desconexión entre celda y celda.

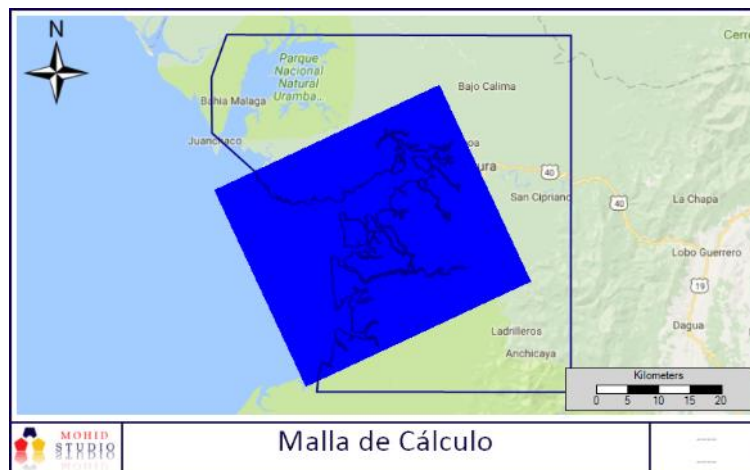


Figura 22 Malla de calculo que delimita el dominio a modelar

La malla se orientó de tal modo que la dirección principal de las líneas de flujo fueran más o menos perpendiculares a la frontera abierta de mar; esto con el fin de evitar posibles errores en el patrón de flujo en las fronteras abiertas, principalmente en la frontera de mar (Rodenhuis, 1993). El ángulo de orientación de la malla fue de 25° respecto al eje EW, dado que fue la inclinación con la cual se logró acomodar de mejor manera los tramos estrechos de la bahía y la dirección del flujo hacia ésta (ver Figura 22).

El tiempo de cálculo es función del tamaño del área a modelar, el tamaño de las celdas de la malla, el intervalo de tiempo y el tiempo total o periodo a ser simulado.

El número de Courant para modelos bidimensionales está definido por la siguiente expresión:

$$Cr = \sqrt{g * h_{max}} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (20)$$

En donde:

Cr = Número de Courant
 Δx = Tamaño de la malla en dirección X [m]
 Δt = Intervalo de tiempo [s]
h = Profundidad del agua [m]
g = Aceleración gravitacional [m/s²].

El valor óptimo para el número de Courant debe ser menor a 4 (Braunschweig, Fernandes, & Lourenca, 2012).

El intervalo de tiempo empleado para desarrollar el proceso de calibración del modelo fue de 8 s, el cual permitió obtener un número de Courant máximo de 3.8, el tiempo computacional para el proceso de modelación no fue excesivo y los resultados obtenidos con este intervalo de tiempo no presentan oscilaciones o inestabilidades numéricas.

8.2.2 ESQUEMATIZACIÓN DE LA BATIMETRÍA

La esquematización del relieve del fondo de la bahía se efectuó con base en los datos batimétricos contenidos en las cartas náuticas 153, 306 y 730 del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hídricas CIOH, las cuales contenían en todo su dominio el área de estudio de la bahía, desde su parte externa hasta la interna; las profundidades fueron referenciadas utilizando como nivel de referencia el nivel de Sicigia, es decir el nivel medio de las bajamares vivas.

Los datos batimétricos y de línea de costa originales fueron revisados y ajustados en repetidas ocasiones, especialmente en los sectores donde se encontraron resultados poco razonables.

Para representar en el modelo los ríos tributarios Dagua y Anchicayá, y dado que no se cuenta con la información batimétrica hasta el límite de influencia mareal, se optó por

estimarla con base en la información disponible de los volúmenes oscilantes para mareas máximas, las longitudes máximas de influencia mareal y la morfología media de los cauces; esta información se tomó del estudio sedimentológico del Laboratorio Central de Francia (LCHF, 1974).

En el río Anchicayá, para un rango de marea máxima registrada de 5.40 m el volumen oscilante es 31.3 millones de m^3 y la longitud de la influencia mareal es aproximadamente 25 km; además, se consideró un ancho medio de 120 m, un factor de rugosidad de Manning de 0.04 s/m^3 y un caudal medio de $152 \text{ m}^3/\text{s}$.

En el río Dagua, en marea viva máxima de 5.4 m de rango el volumen oscilante estimado es 3.1 millones de m^3 , la influencia mareal alcanza una longitud de 10 km y su cauce presenta, en su tramo final, un ancho medio de 60 m; se adoptaron para los cálculos un factor de rugosidad de Manning de 0.04 s/m^3 y un caudal medio de $89 \text{ m}^3/\text{s}$.

Posteriormente, aplicando el método del paso directo para determinar los perfiles de flujo gradualmente variado, se construyó una hoja de cálculo electrónica en Excel. Para ello se asumían los niveles del lecho del río y una vez determinado el perfil de flujo se procedía a calcular el volumen total de agua almacenado en el tramo final del río. Este volumen se comparaba con el volumen oscilante conocido; si los dos volúmenes eran diferentes, entonces se debían ajustar los niveles del lecho y recalcularse el perfil de flujo y el volumen total almacenado; este procedimiento se repetía hasta lograr una diferencia aceptable entre los dos volúmenes. En la Figura 23 se presenta la batimetría generada para los ríos Dagua y Anchicayá.

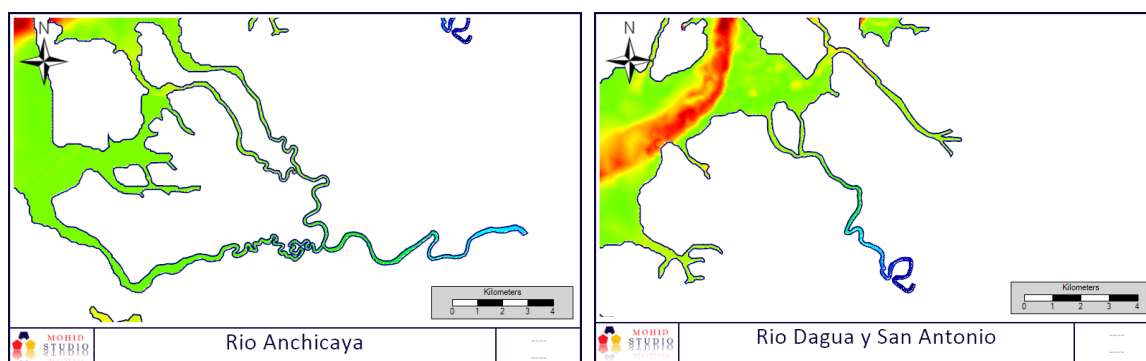


Figura 23 Batimetría generada en los ríos Anchicayá y Dagua respectivamente.

La revisión y ajuste manual de las profundidades batimétricas son procedimientos recomendados para evitar la ocurrencia de inestabilidades en el algoritmo de resolución del modelo.

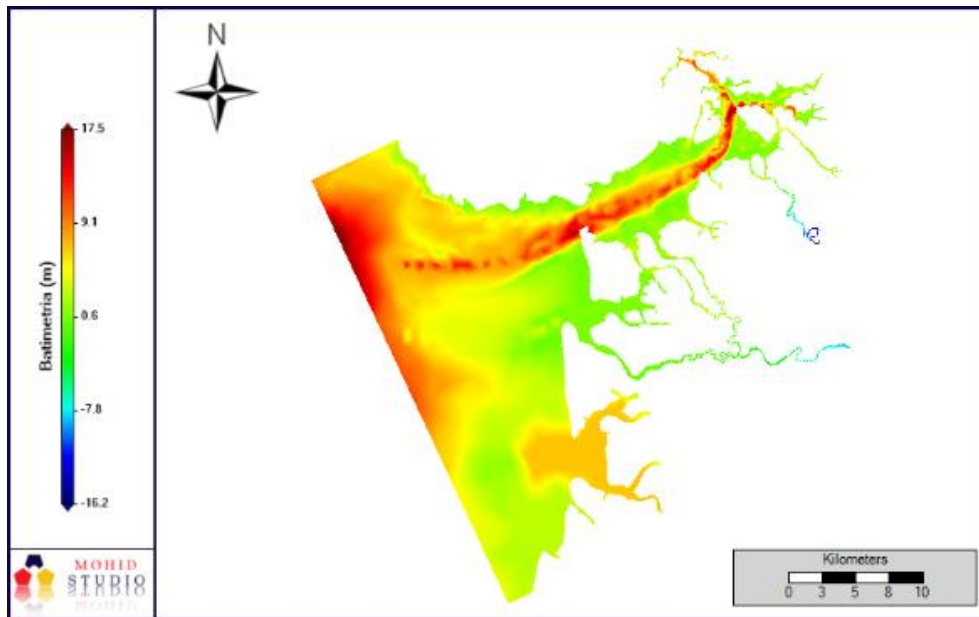


Figura 24 Batimetría de la Bahía de Buenaventura

En la Figura 24 se puede observar que en la batimetría se presenta una variación de profundidades en el dominio modelado, distinguiéndose dos zonas, una es el canal de acceso a la zona portuaria, donde se pueden encontrar profundidades que varían entre 10 y 16 metros y otra en las zonas aledaña al canal de acceso y las zonas de desembocadura de los afluentes donde se presentan profundidades que varían entre 1 y 6 metros.

8.2.3 CONDICIONES DE FRONTERA

8.2.3.1 Mar

Las fronteras abiertas se introducen como forma de limitar el dominio de cálculo a la región de interés en el estudio. En estas fronteras deben imponerse valores de las variables de cálculo para garantizar que la información correspondiente a lo que sucede fuera del dominio ingrese a la zona de cálculo (Fernandez , 2011).

La frontera abierta del modelo está localizada mar afuera y fue utilizada para imponer el efecto de la marea astronómica sobre el dominio. Esto se logra calculando la elevación de la superficie libre del mar en los nodos de la frontera a partir de las principales componentes armónicas de la marea en la costa pacífica colombiana: M2, S2, K1, K2, N2, O1, Q1, P1 y M4 (Fernandez , 2011). Dado que no se tenía información acerca de los niveles de marea mar afuera, para poder calcular los componentes armónicos fue necesario obtener los valores de las amplitudes y fases de cada componente por medio de la solución del atlas global de mareas FES2004 (ver Tabla 14).

ANÁLISIS MAREAL EN LA BAHÍA DE BUENAVENTURA		
COMPONENTE	AMPLITUD (m)	FASE (°)
M2	1.51853	-114.952
S2	0.40225	-60.4288
K1	0.09808	55.3441
K2	0.11424	-66.9127
N2	0.33671	-148.21
O1	0.02393	60.6242
Q1	0.00707	55.5307
P1	0.03218	148.777
M4	0.06304	0

Tabla 14 Componentes armónicas de la marea en la Bahía de Buenaventura obtenidas con el modelo FES2004.

Las componentes armónicas de la marea del FES2004 fueron obtenidas por medio de la construcción de 15 nodos distribuidos a lo largo de la frontera abierta del modelo (ver Figura 24).

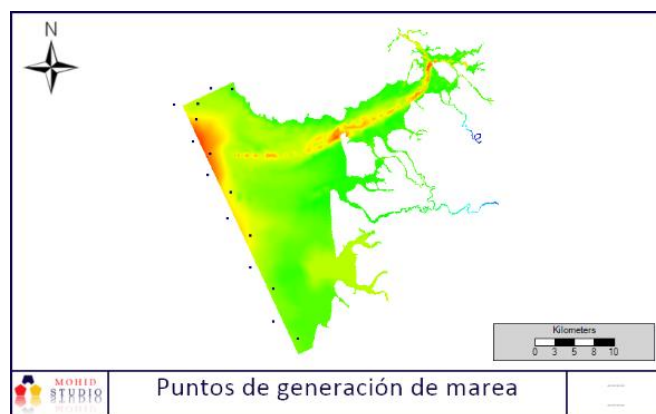


Figura 25 Puntos de generación de marea en la frontera abierta

Por otra parte, para establecer las condiciones de frontera abierta de los sedimentos se creó una descarga de concentraciones, para un estado de marea, con valores encontrados en investigaciones anteriores desarrolladas por la Universidad del Valle en 1998 y 1999.

Los valores ingresados como descargas, para generar la condición de frontera de los sedimentos fueron 150, 250, 350 mg/l.

8.2.3.2 Afluentes

Las fronteras internas o fronteras abiertas en los ríos y esteros se localizaron en los afluentes que desembocan en la bahía interna de Buenaventura en los sectores límites de la influencia mareal. Los caudales fluviales ingresados como condición de frontera fueron los medios anuales en los ríos Anchicayá y Dagua, y los esteros San Antonio y Aguadulce; los valores se encuentran en el literal 8.1.3 Tabla 12.

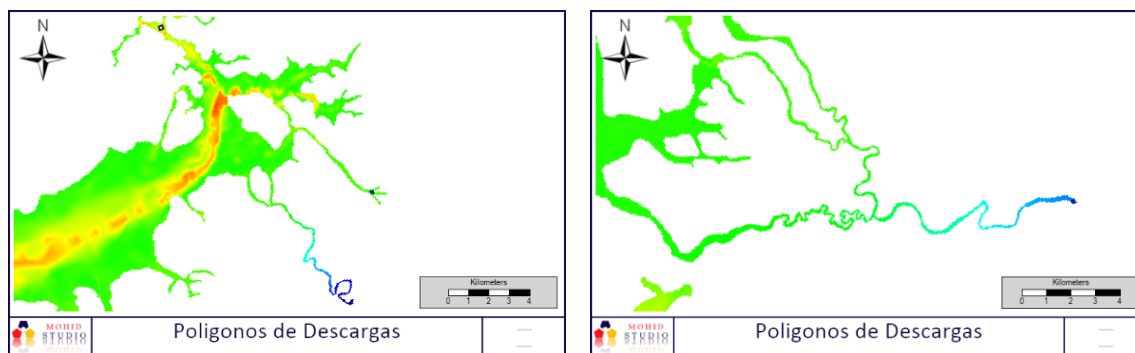


Figura 26 Polígonos creados para la generación de descargas en los ríos Aguadulce, San Antonio, Dagua y Anchicayá respectivamente

En la Figura 26 se presentan los polígonos generados para las descargas de los afluentes.

De igual manera, las condiciones de frontera de los sedimentos en los ríos y esteros fueron ingresadas teniendo en cuenta las concentraciones encontradas en investigaciones anteriores (ver Tabla 15).

RÍOS	CONCENTRACIONES (mg/l)	
	MÍNIMA	MÁXIMA
Río Dagua	200	400
Río Anchicayá	117	120
Esterio Aguadulce	10	25
Río San Antonio	30	50

Tabla 15 Concentraciones mínimas y máximas encontradas en los ríos y esteros en la Bahía de Buenaventura

8.2.4 CONDICIONES INICIALES

Para tener un problema de ecuaciones diferenciales bien propuesto se deben especificar conjuntos de condiciones iniciales y de frontera (Palacio Tobón, 2002). Para solucionar estas ecuaciones en el tiempo es necesario definir las condiciones hidrodinámicas y sedimentológicas.

Normalmente las condiciones iniciales asignadas no corresponden a la solución de las ecuaciones, pues muy difícilmente se pueden medir de manera simultánea los niveles de marea sobre toda el área de estudio. Esto ocasionará falsas oscilaciones en la solución hasta que son amortiguadas por las fuerzas de fricción (Universidad del Valle, 1998).

En este estudio para la condición inicial de elevación de la superficie del mar, se estableció un valor de referencia uniforme en todo el dominio de cálculo, igual a 2.24 m, correspondiente al nivel medio del mar, y para el campo de las velocidades la condición inicial partió del reposo; solamente es necesario un tiempo corto de calentamiento para que las velocidades y niveles se ajusten a la acción de los forzantes considerados.

Las condiciones sedimentológicas fueron asignadas por medio de zonas (denominadas cajas en el modelo MOHID) (ver Figura 27). Los valores asignados de manera constante corresponden a concentraciones de sedimentos en suspensión (ver Tabla 16).

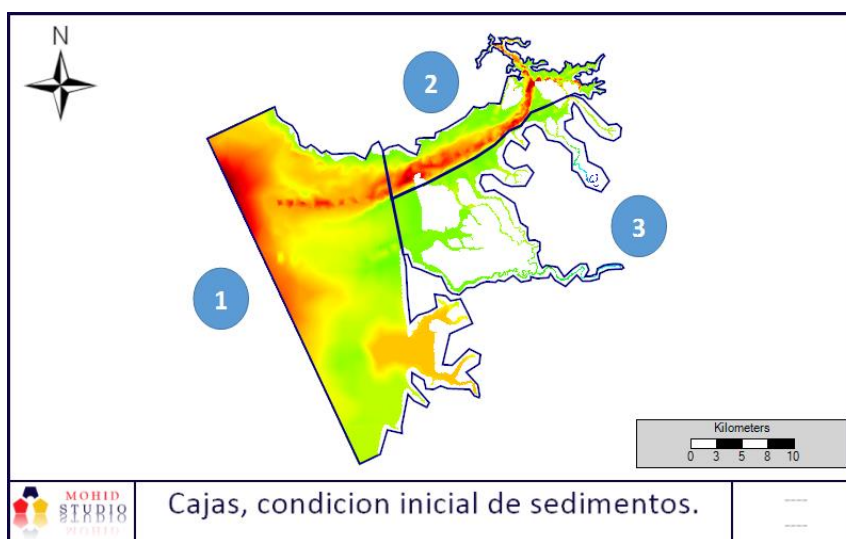


Figura 27 Cajas para ingreso de la condición inicial de los sedimentos en la Bahía.

CAJAS	CONCENTRACIONES INICIALES DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN (mg/l)		
	MÍNIMAS	MEDIAS	MÁXIMAS
1	65	158	250
2	70	110	150
3	100	150	200

Tabla 16 Concentraciones de sedimentos ingresadas por cajas en el modelo

Estos valores fueron obtenidos de mediciones de campo realizadas anteriormente en la Bahía de Buenaventura, como en el Monitoreo del Fenómeno del Niño en el Canal de Acceso al Puerto de Buenaventura (Universidad del Valle, 1998).

8.2.5 CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración de un modelo consiste en el proceso de ajuste de los elementos geométricos simplificados (batimetría, contornos de estructura, etc.) y de los valores de los coeficientes empíricos (hidráulicos, de transporte, del sedimento, etc.) que aparecen en las diferentes ecuaciones (hidrodinámicas y de los sedimentos, etc.), de tal manera que los eventos simulados en el modelo reproduzcan de la mejor manera posible los eventos de la naturaleza (Universidad del Valle, 1999).

La metodología más utilizada para calibrar un modelo computacional es la metodología de ensayo y error. Esta metodología, además de tediosa, consume demasiado tiempo computacional y depende de la experiencia del modelador (Palacio Tobón, 2002). Por consiguiente, los resultados del modelo al inicio del proceso de calibración difieren en mayor a menor grado de los valores medidos en la naturaleza. El objetivo fundamental de la calibración es, por lo tanto, afinar el modelo de tal manera que las diferencias entre los valores calculados en la simulación y los valores medidos en la naturaleza sea mínima. (Universidad del Valle, 1999).

El proceso de calibración y validación del modelo se debe realizar para diferentes periodos que se consideren importantes en el estudio; en el caso de la Bahía de Buenaventura el proceso de calibración y validación se realizó teniendo en cuenta las mareas vivas (máximas amplitudes) y mareas muertas (mínimas amplitudes).

En la Bahía de Buenaventura se dispone de información de estudios de campo acerca de niveles de marea, patrones de flujo, concentraciones de sedimentos en suspensión, velocidades de las corrientes, salinidad y temperatura; información recopilada por el Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico de la Universidad del Valle y adquirida a finales de los años 90. A su vez, también se cuenta con información semejante en estudios de diseño de dragado desarrollados en los años 2000.

Sin embargo, la información disponible presenta algunas limitaciones, tales como, la continuidad en la toma de datos y muestras, la cobertura de la información a lo largo de toda la bahía y en sus afluentes y, por último, la no actualización de los datos, dado que no se han realizado recientemente trabajos de campo exhaustivos que permitan una actualización de la caracterización de toda la bahía.

No obstante, a pesar de las limitaciones en la información disponible el proceso de calibración del modelo se puede considerar aceptable y satisface las necesidades del proyecto de investigación.

8.2.6 CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA

El proceso de calibración del modelo hidrodinámico de la Bahía de Buenaventura se realizó ajustando los parámetros del coeficiente de rugosidad y la viscosidad turbulenta. Sin embargo, en algunas ocasiones fue necesario realizar ajustes sobre la batimetría dado que se presentaban inestabilidades en lugares determinados de esta y ajustes en la condición de frontera abierta del modelo.

La marea astronómica se ingresó al modelo como condición de frontera abierta, imponiendo las fases y amplitudes obtenidas con el modelo global de mareas FES2004. A efecto de calibración del modelo fue necesario ajustar dichas fases y amplitudes, teniendo en cuenta que para las primeras modelaciones las mareas simuladas diferían apreciablemente de las mareas registradas en campo.

Los ajustes realizados a los resultados de los armónicos consistieron en confrontar los resultados arrojados por el FES2004 con los armónicos de marea que se tenían del Estudio Hidrodinámico y Sedimentológico, Modelación Matemática MIKE 21 de 1999 y modificarlos manualmente, al igual que modificar el “Reference_Level” o Nivel de Referencia de generación de la marea, con el nivel de Sicigia y el nivel medio del mar 2.24 m.

Este proceso de ajuste de los armónicos de marea se logró a través de un proceso repetitivo de ensayo y error donde se evidenciaban los cambios realizados.

La calibración del modelo hidrodinámico se realizó comparando los niveles de marea obtenidos en tres puntos de medición de las campañas realizadas por el Laboratorio de Proyectos Hidráulicos del Pacífico de la Universidad del Valle en el año 1997. La

ubicación en el modelo y las coordenadas de los puntos de referencia se presentan en la Figura 28 y Tabla 17.

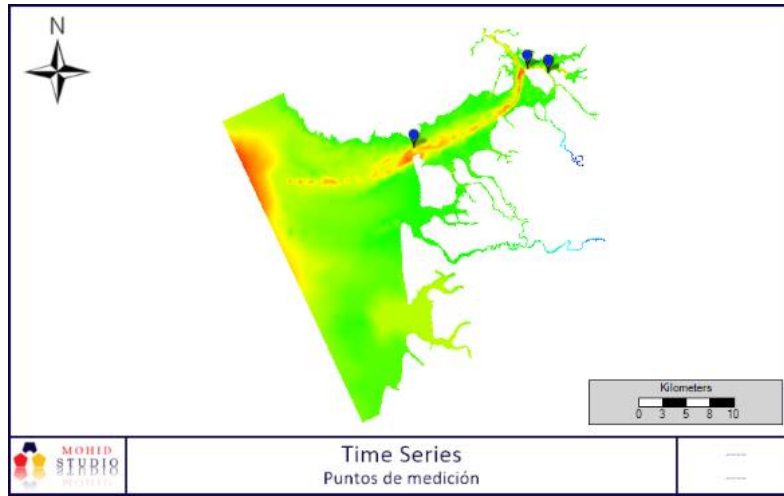


Figura 28 Puntos de control o "Time Series" de la Bahía

PUNTOS DE MEDICIÓN		
NOMBRE	LONGITUD	LATITUD
Bocana	77°11'04" O	3°49'24" N
Muelle	77°05'56" O	3°54'54" N
Mareógrafo	77°03'41" O	3°53'33" N

Tabla 17 Coordenadas de los puntos de control o "Time Series" de la bahía

8.2.6.1 Rugosidad del lecho

El modelo matemático MOHID ofrece la posibilidad de calcular el coeficiente de arrastre de fondo C_f en función de la rugosidad absoluta de fondo (z_o) o del coeficiente de rugosidad de Manning (n) (Fernandez , 2011), así:

$$C_f = \left(\frac{k}{\ln\left(\frac{z+z_o}{z_o}\right)} \right)^2 \quad (21)$$

Donde z es la distancia al fondo y $k=0.4$ es la constante de Von Karman.

$$C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}} \quad (22)$$

Donde h es la profundidad local.

En este estudio se implementó la formulación del coeficiente de arrastre de fondo C_f en función del coeficiente de rugosidad de Manning (n) los valores probados como coeficiente fueron 0.024, 0.028, 0.030, 0.033 y 0.035 de manera constante sobre todo el dominio modelado de la Bahía de Buenaventura.

En la Figura 29 se presenta el cálculo del coeficiente de determinación R^2 obtenido con la variación del coeficiente de rugosidad en los dos puntos de medición (Muelle

y Bocana), por medio del método de la regresión lineal, el cual permite determinar el grado de asociación existente entre dos variables, en este caso los niveles de marea medidos y los niveles de marea modelados. En la Tabla 18, se presentan los valores del coeficiente de determinación obtenidos para cada rugosidad.

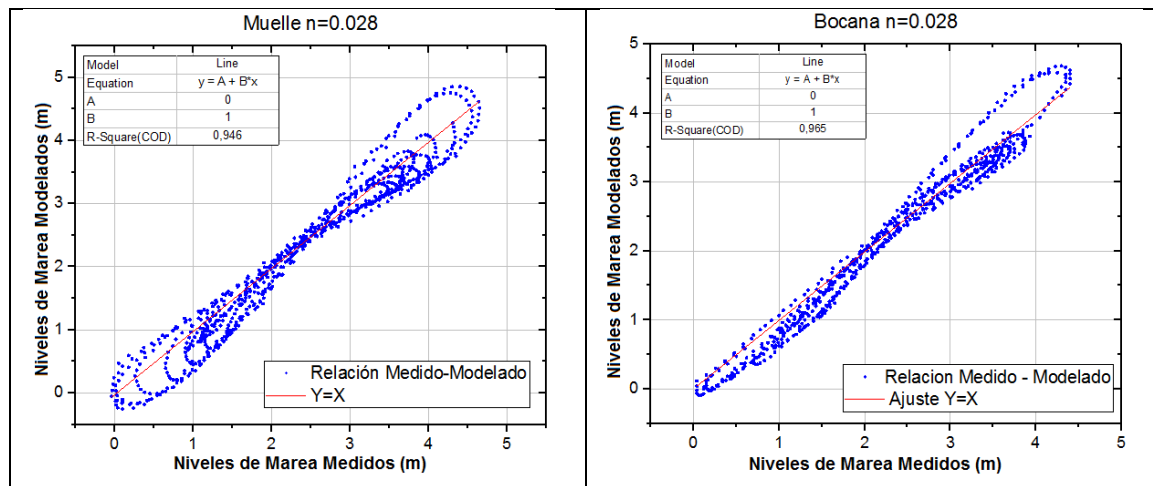


Figura 29 Aplicación del Método de Regresión Lineal para el Coeficientes de Rugosidad en los Puntos de medición Muelle y Bocana.

COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN, R^2		
RUGOSIDADES	MUELLE	BOCANA
0.024	0.943	0.961
0.028	0.946	0.965
0.03	0.944	0.963
0.033	0.926	0.965
0.035	0.919	0.968

Tabla 18 Coeficiente de determinación para cada rugosidad en los puntos de medición, para los niveles de marea

El cálculo del coeficiente de determinación permitió definir el valor de rugosidad que producía los niveles de marea más próximos a los niveles registrados en campo (ver Figura 29).

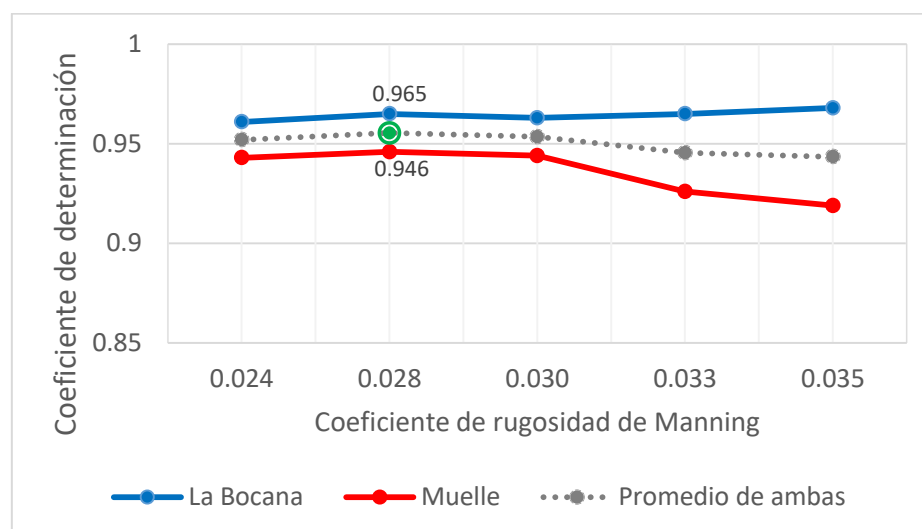


Figura 30 Cálculo del coeficiente de Determinación para cada rugosidad.

Como resultado se obtuvo que el valor que mejor se ajustaba en la calibración del modelo es correspondiente a un coeficiente de rugosidad de Manning (n) de 0.028 s/m^{1/3}.

8.2.6.2 Viscosidad Turbulenta

El modelo matemático MOHID dispone de varias expresiones para determinar los coeficientes de viscosidad turbulenta, por medio de valores constantes o variables.

Uno de las expresiones usadas en el modelo matemático Mohid para el cálculo de la viscosidad turbulenta se basa en el modelo de Smagorinski (1963); este asume que la longitud característica de los remolinos son proporcionales al tamaño de la malla y se define como:

$$V_H = \frac{1}{2} C_m (\Delta x \cdot \Delta y) \sqrt{\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)^2 + \frac{\left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y}\right)^2}{2} + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y}\right)^2} \quad (23)$$

Siendo C_m el coeficiente de Smagorinski, la anterior expresión no tiene en cuenta el efecto del fondo ni la profundidad.

La viscosidad turbulenta es un parámetro que no se puede medir directamente en campo y, por lo tanto, se constituye en un parámetro de calibración; durante el proceso de calibración se ensayaron diferentes valores para el coeficiente de viscosidad horizontal (5, 10, 30 y 60 m²/s). De los valores ensayados, se encontró que una viscosidad de 5 m²/s es el valor; que mejor representa los niveles de marea en la Bahía de Buenaventura.

En las Figuras 31 a 34 se presentan los resultados obtenidos de los niveles de marea modelados, teniendo en cuenta los valores que mejor se ajustaron a los niveles de marea medidos, para los parámetros más importantes del proceso de calibración como son el coeficiente de rugosidad y la viscosidad turbulenta.

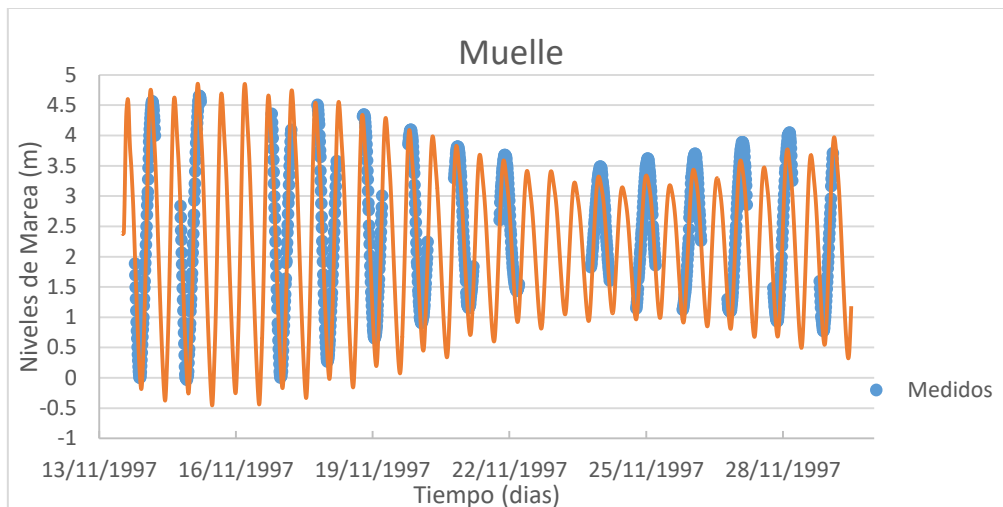


Figura 31 Niveles de marea medidos y calculados en el Muelle empleando Rugosidad de Manning 0.028 y Viscosidad Turbulenta 5 m²/s

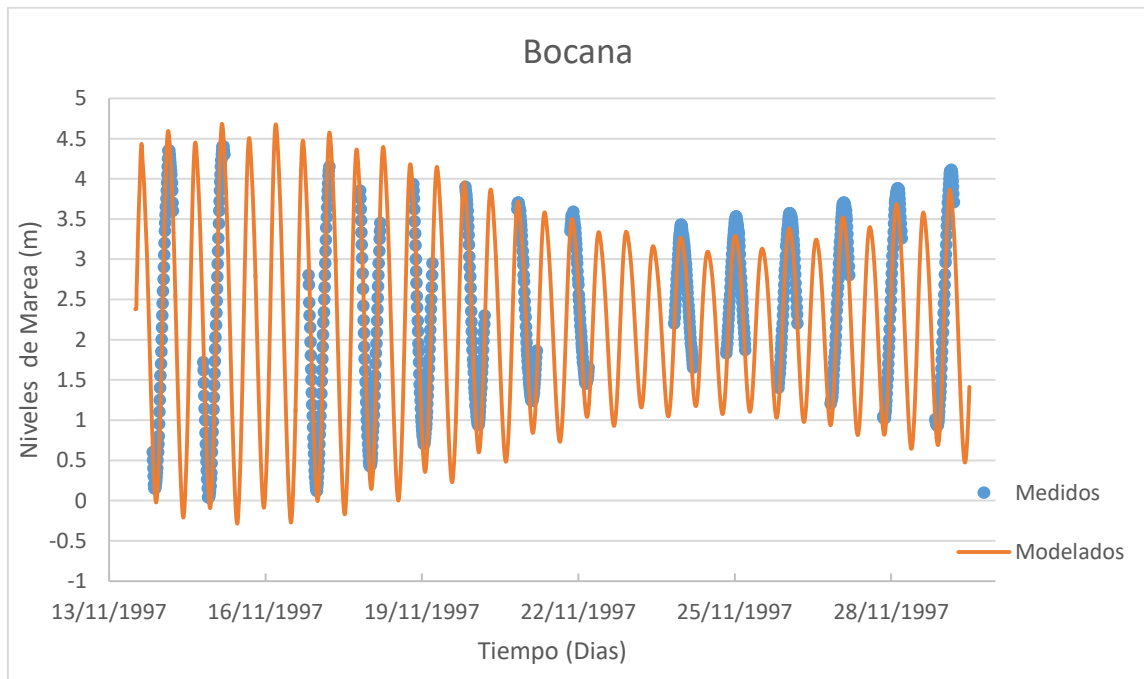


Figura 32 Niveles de marea medidos y calculados en la Bocana empleando Rugosidad de Manning 0.028 y Viscosidad Turbulenta $5 \text{ m}^2/\text{s}$

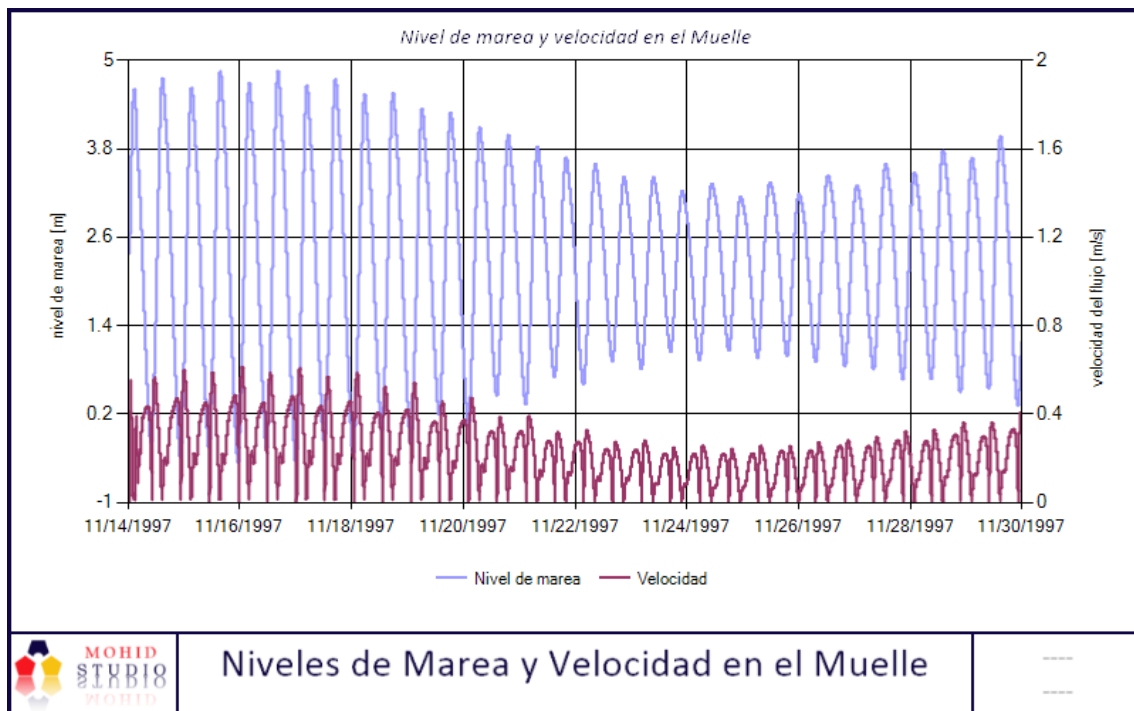


Figura 33 Niveles de marea y velocidades calculadas en el Muelle.

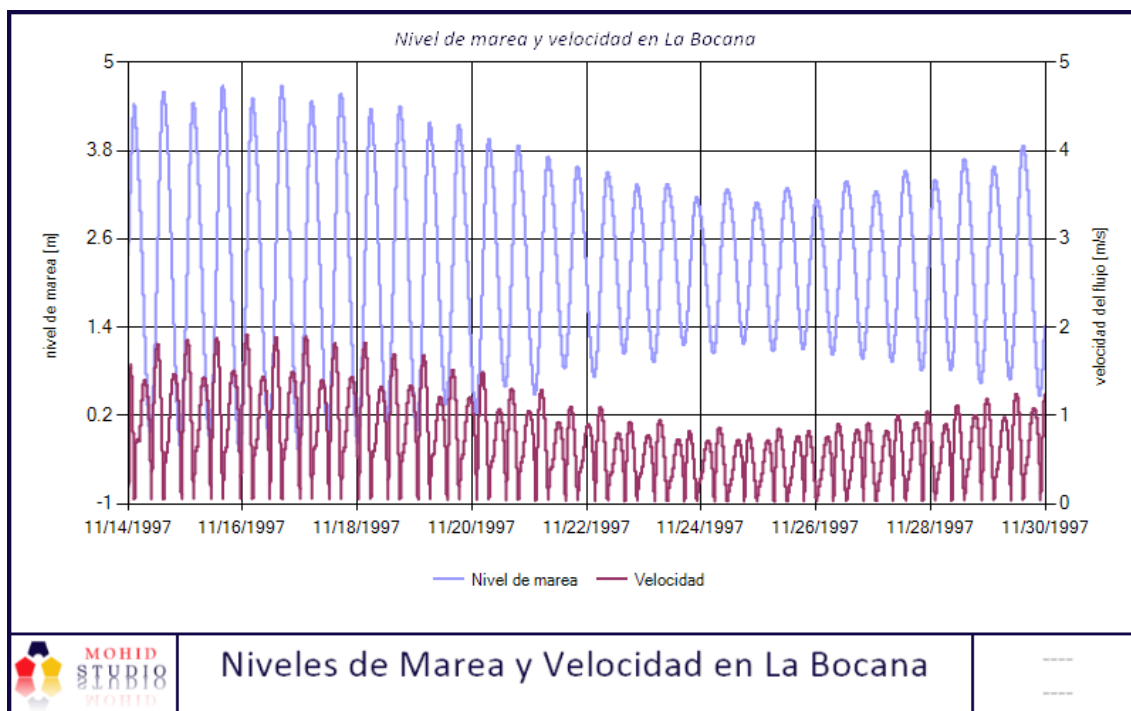


Figura 34 Niveles de marea y velocidades calculadas en la Bocana

Como se observa en las gráficas de los niveles de marea, los niveles modelados se ajustan lo suficiente a los valores medidos y a su vez simulan el comportamiento de mareas vivas y muertas para un periodo de 15 días, correspondiente a medio ciclo lunar.

Las velocidades tienen un comportamiento aceptable, dado que se registran valores mayores en las mareas vivas que en las mareas muertas. De igual manera los valores mínimos se presentan en los tiempos próximos a las pleamares y bajamares.

Los valores obtenidos como máximas velocidades también representan el comportamiento de la bahía, ya que se obtuvieron mayores velocidades en el sector de La Bocana que en el sector de Muelle. Las velocidades obtenidas en el modelo oscilan entre 1 y 1.5 m/s y el valor máximo obtenido para este ciclo de marea modelado es inferior a 2 m/s.

Si bien los puntos de medición con los cuales se realizó la calibración del modelo son pocos, se puede apreciar un buen ajuste en el comportamiento de la amplitud de la marea. Por lo tanto, los resultados obtenidos en la presente investigación se pueden considerar cercanos al comportamiento real de la bahía de Buenaventura y pueden servir para diferentes aplicaciones que requieran el registro del comportamiento hidrodinámico.

8.2.7 CALIBRACIÓN SEDIMENTOLÓGICA

La calibración sedimentológica del modelo resultó ser una labor bastante compleja dado las características altamente variables existentes en la Bahía, ya que es un sistema hidrodinámico en el cual interactúan las corrientes mareales, las descargas de agua dulce de los ríos y esteros y las corrientes generadas por el oleaje.

De igual manera, la información disponible acerca de los sedimentos es muy limitada y posiblemente menos confiable en comparación con la información hidrométrica disponible.

Por otra parte se dispuso de información acerca de concentraciones de sedimentos en suspensión en zonas específicas de la Bahía, tomados del Monitoreo del Fenómeno del Niño, Canal de Acceso al Puerto de Buenaventura, 1998. Los valores acerca de las velocidades críticas de erosión y sedimentación para la Bahía de Buenaventura se obtuvieron del Estudio Hidrodinámico y Sedimentológico, Modelación Matemática Mike 21 (Universidad del Valle, 1998).

El proceso de calibración sedimentológica se realizó determinando los esfuerzos críticos y concentraciones que mejor se ajustaban a los resultados puntuales de sedimentos en suspensión obtenidos en el Monitoreo del Fenómeno del Niño, 1998.

8.2.7.1 Esfuerzos críticos

Para la implementación de los sedimentos en la Bahía el modelo matemático MOHID requiere la especificación de los esfuerzos críticos de erosión y sedimentación y la tasa de erosión para un determinado tamaño de partícula.

Para el proceso de calibración fue necesario calcular los esfuerzos críticos de erosión y sedimentación y las velocidades de caída de las partículas; esto se realizó partiendo de las velocidades críticas de erosión y sedimentación encontradas en investigaciones anteriores sobre la Bahía de Buenaventura y aplicando las ecuaciones indicadas en los literales 6.2.3 y 6.2.4; por último se asociaron los esfuerzos y velocidades de caída a un tamaño de partícula (Universidad del Valle, 1999).

En las Tablas 19 y 20 se presentan las velocidades críticas de erosión y sedimentación obtenidas de investigaciones anteriores y usadas para calcular los respectivos esfuerzos de erosión, sedimentación y velocidades de caída para las diferentes partículas; el tamaño asociado de cada partícula se determinó teniendo en cuenta las Figuras 35 y 36 del libro de Van Rijn.

VELOCIDAD CRÍTICA DE SEDIMENTACIÓN	ESFUERZO CRÍTICO DE SEDIMENTACIÓN	VELOCIDAD DE CAÍDA		DIÁMETRO DE PARTÍCULA
V_{cd} (m/s)	τ_{cd} (N/m ²)	Wc (m/s)	Wc (mm/s)	d_{prom} (mm)
0,1	0,04	0,00478	4,78	0,08
0,15	0,08	0,00717	7,17	0,1
0,25	0,23	0,01195	11,95	0,15

Tabla 19 Esfuerzos críticos de sedimentación y velocidad de caída

VELOCIDAD CRÍTICA DE EROSIÓN	ESFUERZO CRÍTICO DE EROSIÓN	DIÁMETRO DE PARTÍCULA
V_{ce} (m/s)	τ_{ce} (N/m ²)	d_{prom} (mm)
0,2	0,15	0,08
0,3	0,33	0,1
0,4	0,59	0,15

Tabla 20 Esfuerzo crítico de erosión

Las partículas asociadas a estas velocidades de caída son arenas finas y muy finas con diámetros promedios de 0.08 mm a 0.15 mm (Van Rijn, 1990).

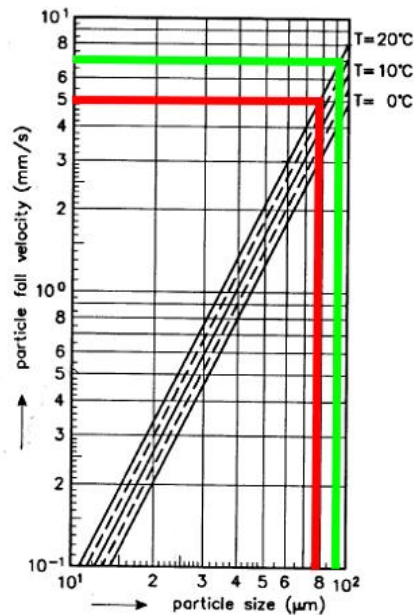


Figura 35 Velocidad de caída para tamaños de partículas menores a 100 μm de acuerdo con Stokes.

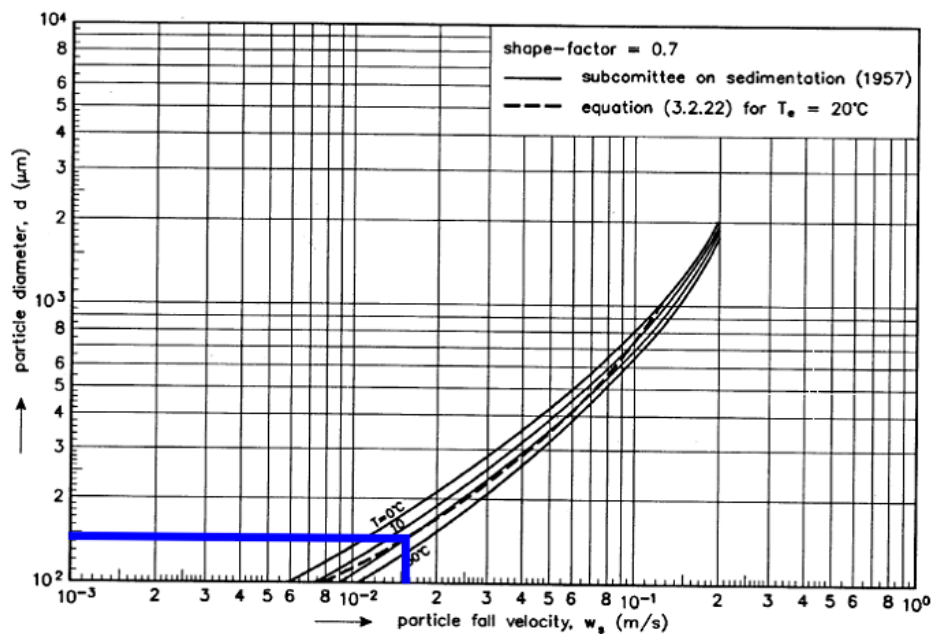


Figura 36 Velocidad de caída para tamaños de partículas mayores a 100 μm de acuerdo con el comité interinstitucional de los Estados Unidos (1957).

Los esfuerzos empleados en el modelo sedimentológico de la Bahía fueron: 0.04 N/m² para el esfuerzo de sedimentación, 0.15 N/m² para el esfuerzo de erosión y una velocidad de caída de 4.78 mm/s, correspondiente a partículas de arenas muy finas con un diámetro de 0.08 mm.

8.2.7.2 Concentraciones

El modelo matemático MOHID ofrece la posibilidad de ingresar las concentraciones iniciales y de frontera abierta como propiedades del agua. Para este proceso se ingresaron concentraciones mínimas, medias y máximas; presentando un mejor comportamiento las concentraciones mínimas en comparación con los datos de campo.

En la Figura 37 se presentan las concentraciones de sedimentos en suspensión obtenidas para los parámetros que mejor se ajustaron en este proceso de calibración sedimentológica.

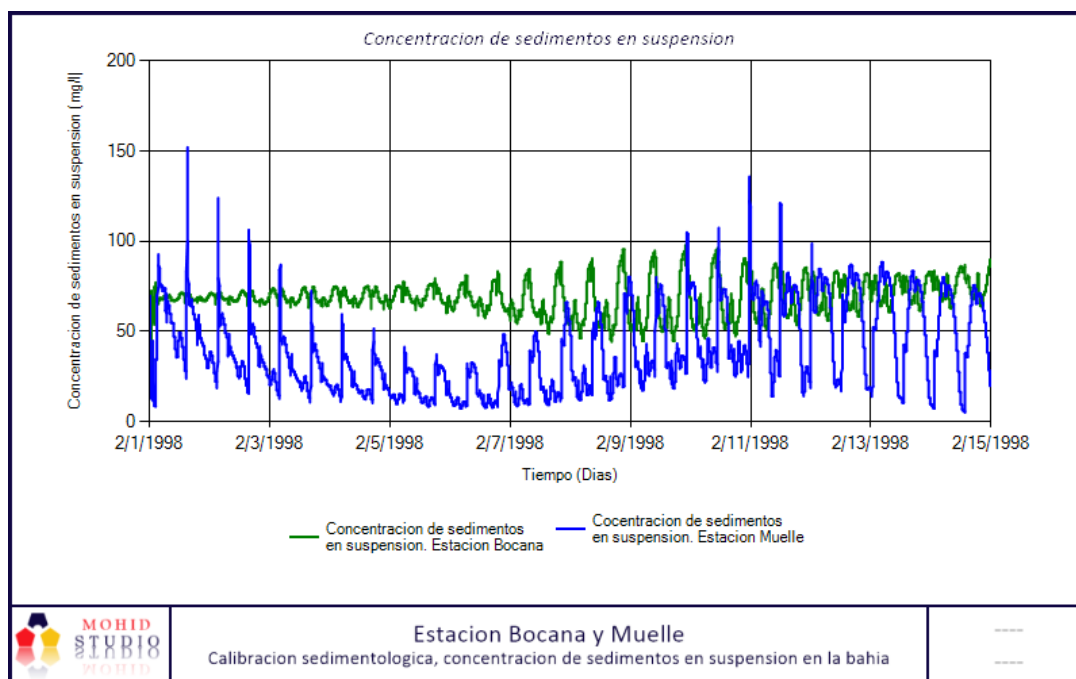


Figura 37 Calibración sedimentológica de la bahía; concentración de sedimentos en suspensión en las estaciones Bocana y Muelle.

Los resultados obtenidos reflejan que el modelo matemático representa correctamente el comportamiento real de la Bahía. Según los resultados de las mediciones de campo realizados en el Monitoreo del Fenómeno del Niño, Canal de Acceso al Puerto de Buenaventura de 1998, para el día 5 de febrero de 1998 se registraron concentraciones de sedimentos en suspensión cercanas a 60 mg/l en la zona denominada Bocana, resultado acorde con lo mostrado en las figuras con valores que oscilan entre 75 y 60 mg/l.

Para el día 11 de febrero de 1998 los resultados de las mediciones de campo registraron valores de concentraciones de sedimentos de aproximadamente 40 mg/l, dato similar a los resultado obtenidos por el modelo matemático ya que los valores obtenidos oscilan entre 40 y 50 mg/l. Para la Bocana se registraron valores entre 76 y 100 mg/l, y los obtenidos en el modelo fueron entre 50 y 100 mg/l.

8.2.8 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad permite evaluar la influencia de un determinado parámetro físico o numérico en los resultados de la simulación de un proceso o de un sistema. Es decir, permite investigar la respuesta del sistema cuando un parámetro dado es modificado (Universidad del Valle, 1999).

8.2.8.1 Hidrodinámica

En el análisis de sensibilidad hidrodinámica se evaluó la influencia de la rugosidad del lecho y la viscosidad turbulenta en los cambios de los niveles de agua y las velocidades de las corrientes.

El factor de rugosidad de manning se varió desde $0.024 \text{ s/m}^{1/3}$ a $0.035 \text{ s/m}^{1/3}$, los resultados se pueden observar en las Figuras 38 y 39; de estas se puede concluir, que el factor de rugosidad produce cambios aunque poco perceptibles en los niveles de agua; es decir los cambios encontrados en los niveles de agua fueron poco apreciables al variar la rugosidad. De igual manera se analizaron los cambios que produce la rugosidad sobre la velocidad y se determinó que ésta sí es sensible, dado que los cambios son más apreciables, tal como se puede observar en las Figuras 40 y 41.

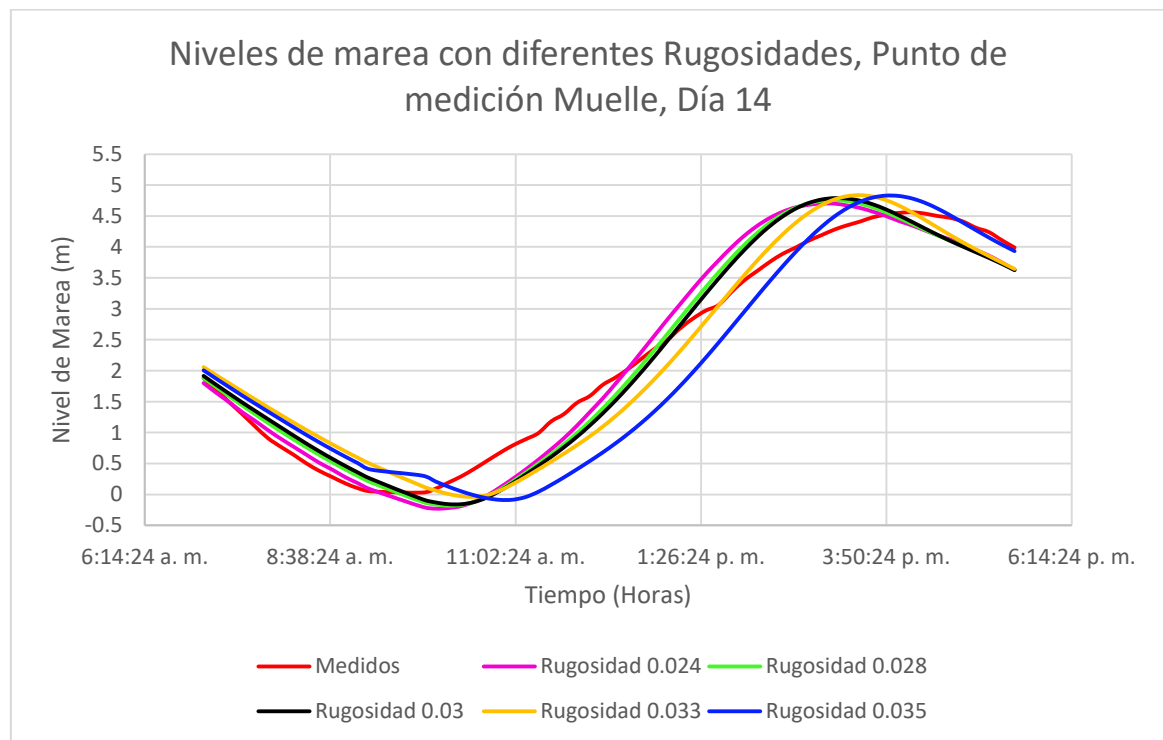


Figura 38 Análisis de sensibilidad del modelo. Influencia de la rugosidad en los niveles de marea en el Muelle de la SRPB.

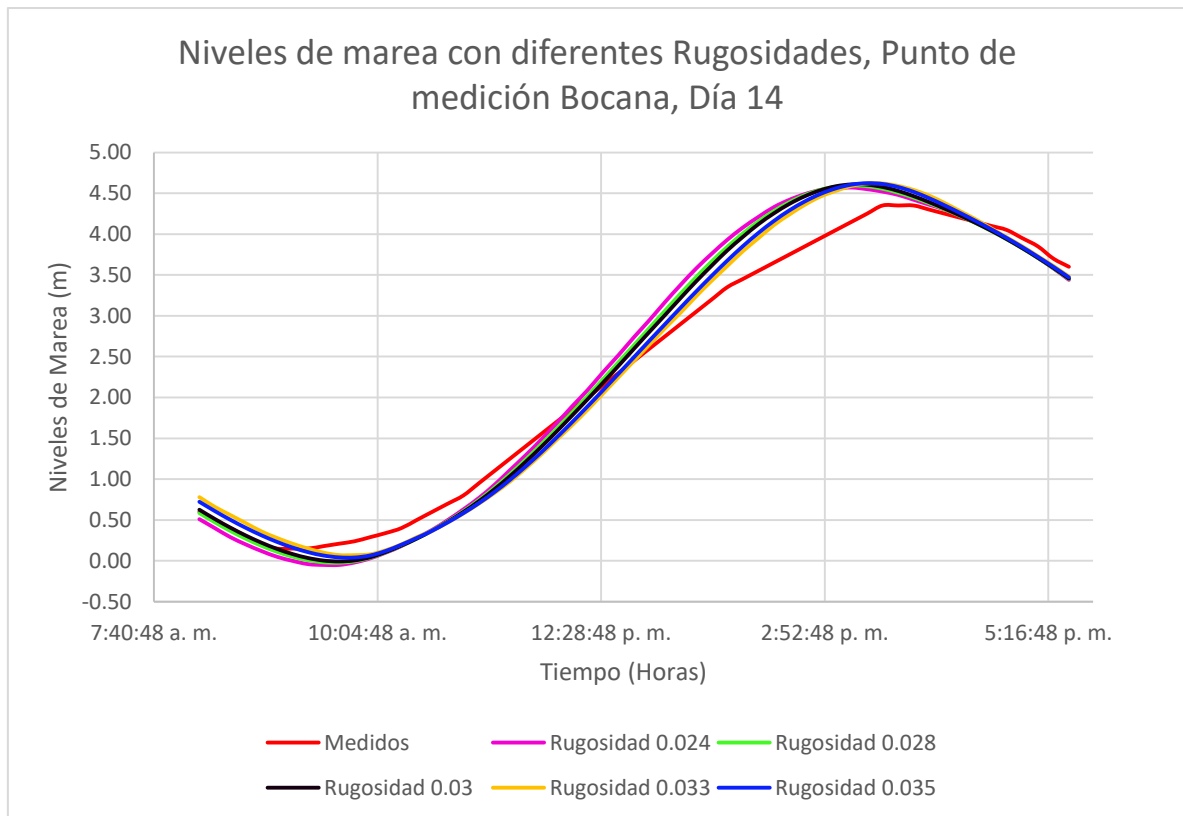


Figura 39 *Análisis de sensibilidad del modelo. Influencia de la rugosidad en los niveles de marea en la Bocana.*

En las Figuras de niveles de marea solo se presenta un día de modelación y de datos medidos con el fin de poder observar de mejor manera los posibles cambios.

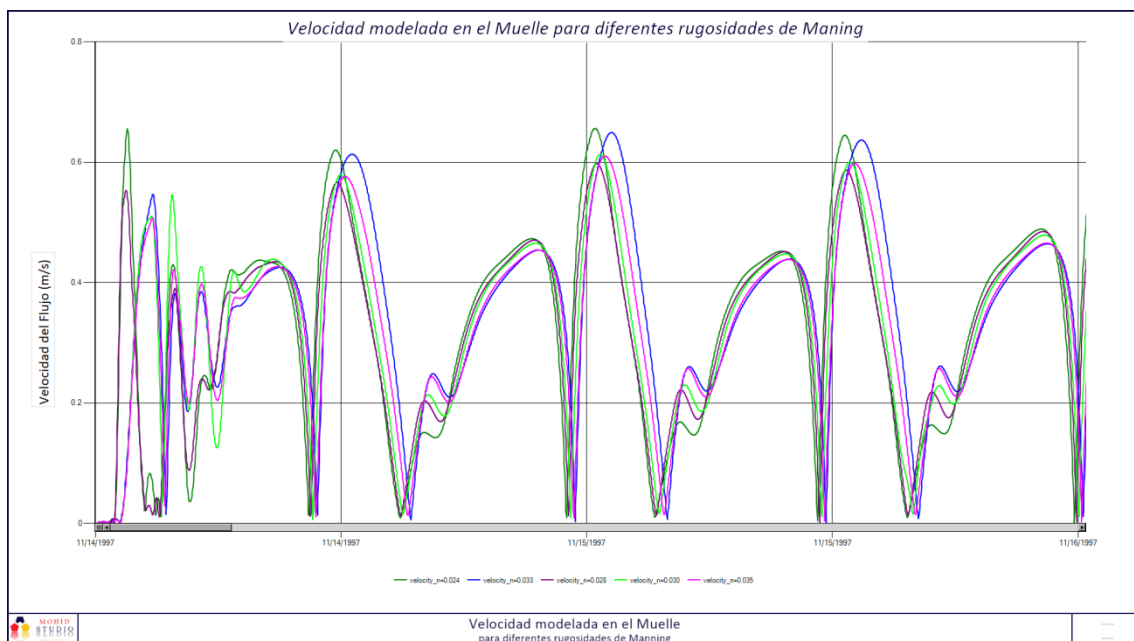


Figura 40 *Análisis de sensibilidad del modelo. Influencia de la rugosidad en las velocidades del flujo en el Muelle de la SPRB.*

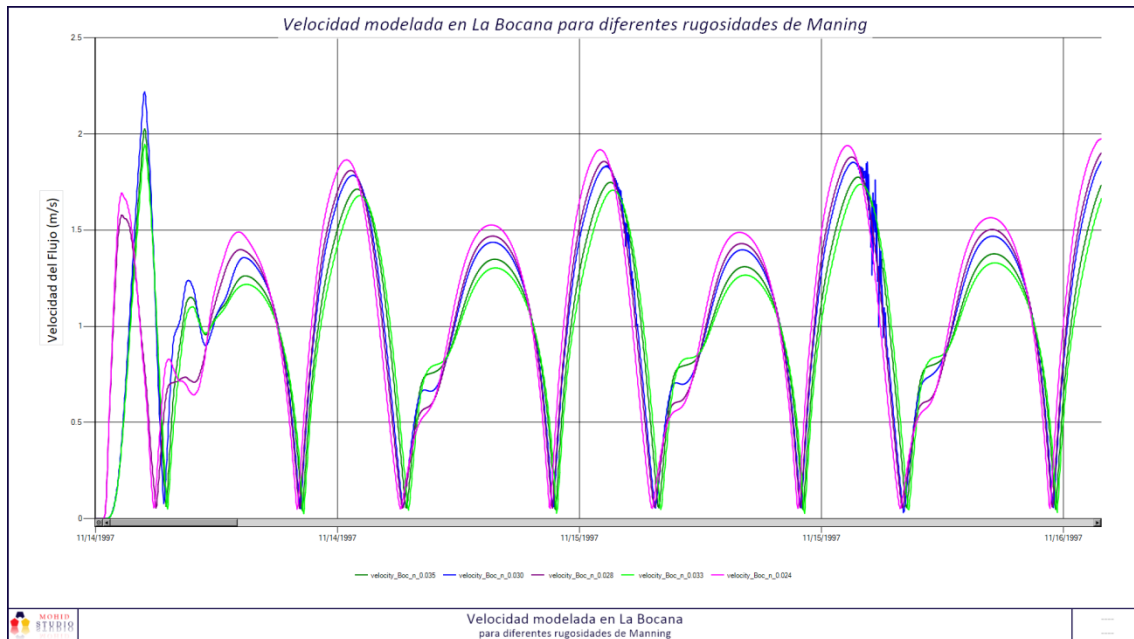


Figura 41 Análisis de sensibilidad del modelo. Influencia de la rugosidad en las velocidades del flujo en la Bocana.

La viscosidad turbulenta fue variada desde 5 hasta 60 m^2/s y de los cuales se pudo determinar que no se presentan cambios significativos para el cálculo de los niveles de agua, en la determinación de las velocidades de las corrientes se observa un pequeño cambio pero poco significativo. En las Figuras 42 a 45 se presenta los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad de la viscosidad turbulenta.

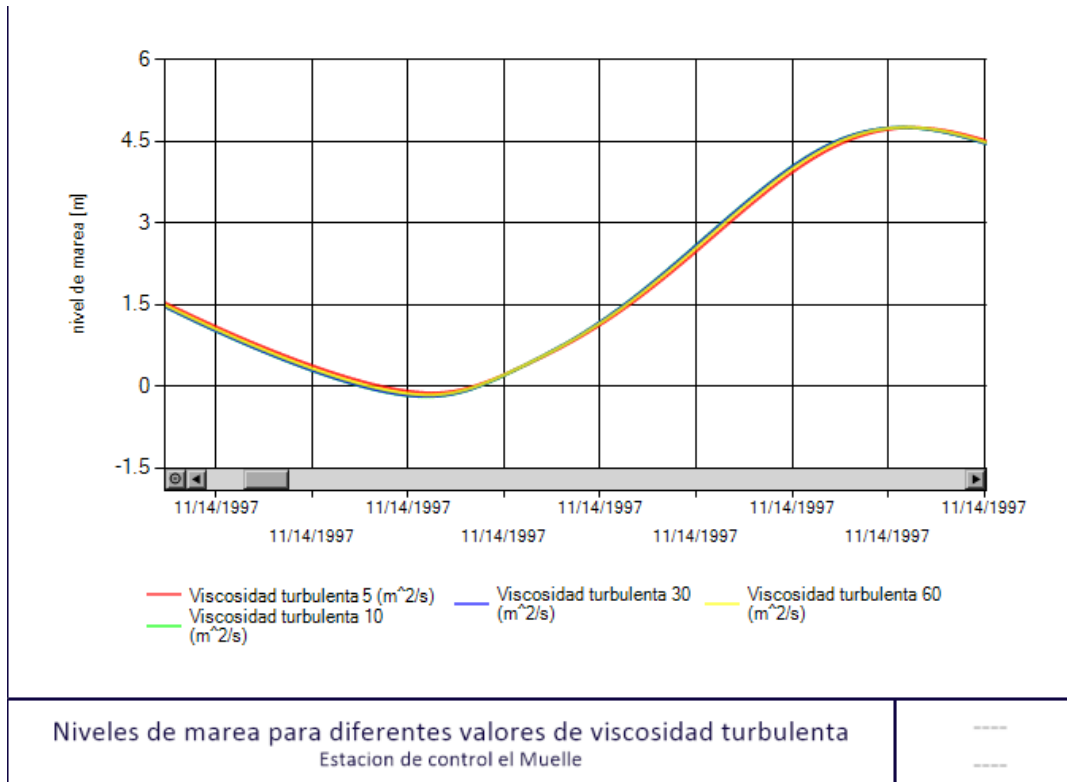
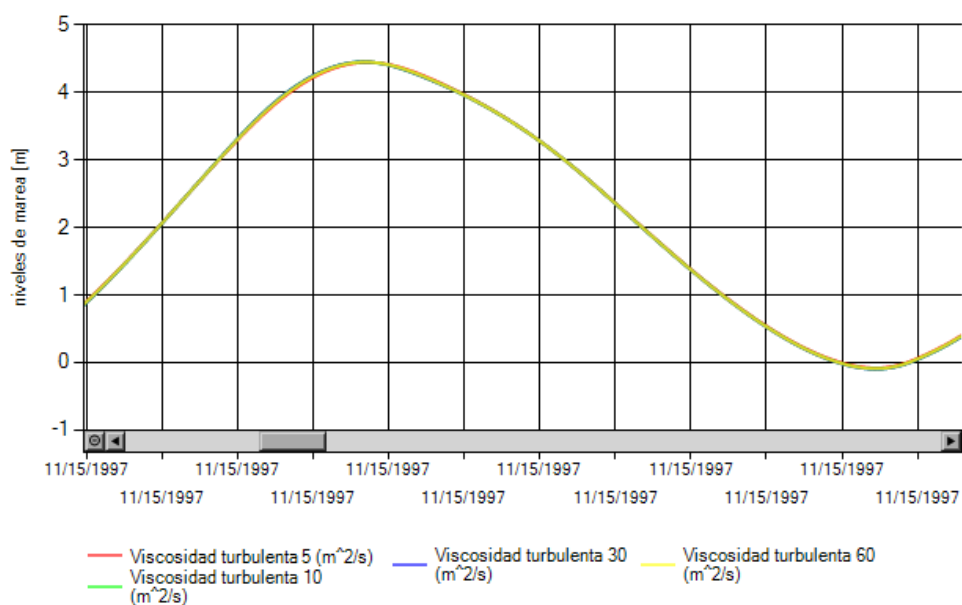
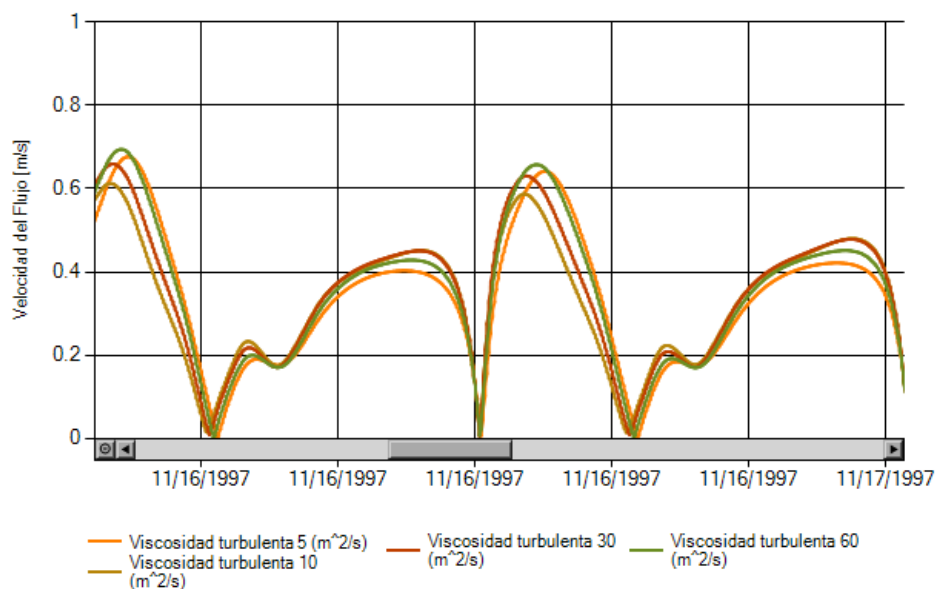


Figura 42 Análisis de sensibilidad del modelo. Influencia de la viscosidad turbulenta en los niveles de marea en el Muelle.



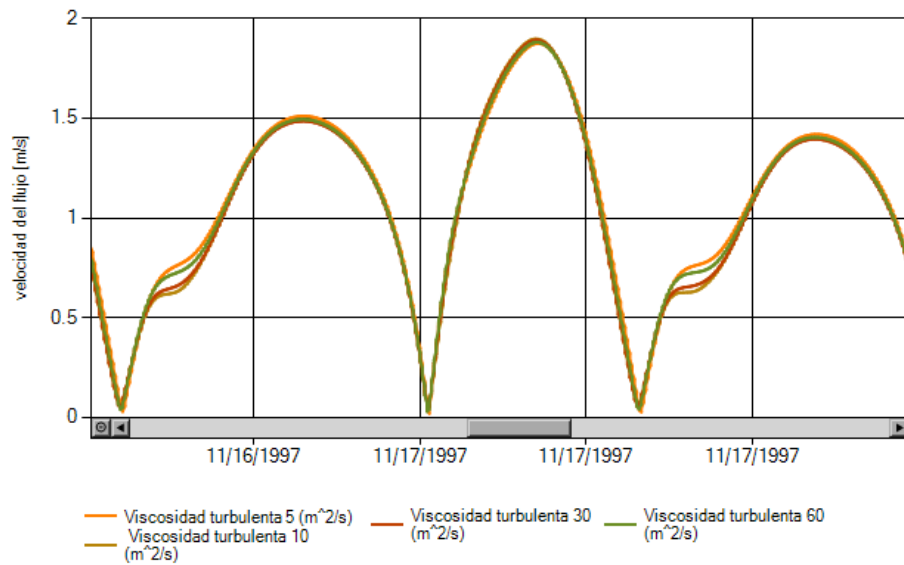
Niveles de marea para diferentes valores de viscosidad turbulenta
 Estacion de control La Bocana

Figura 43 Análisis de sensibilidad del modelo. Influencia de la viscosidad turbulenta en los niveles de marea en la Bocana.



Velocidad del flujo para diferentes valores de viscosidad turbulenta
 Estacion de control el Muelle

Figura 44 Análisis de sensibilidad del modelo. Influencia de la viscosidad turbulenta en las velocidades del flujo en el Muelle.



Velocidad del flujo para diferentes valores de viscosidad turbulenta
Estacion de control La Bocana

Figura 45 Análisis de sensibilidad del modelo. Influencia de la viscosidad turbulenta en las velocidades del flujo en la Bocana.

8.2.8.2 Sedimentológico

Debido a las muchas limitaciones en la información de campo disponible y a la complejidad de los procesos sedimentológicos en un sistema estuarino, como el de la bahía de Buenaventura, para hacer efectivo el proceso de calibración, se investigó a través de un análisis de sensibilidad la influencia de alguno de los principales parámetros que determinan los procesos sedimentológicos.

Los esfuerzos cortantes de erosión y sedimentación críticos y la velocidad de caída de las partículas son parámetros bastante sensibles en los procesos sedimentológicos de la bahía; esto se puede observar en las Figuras 46 y 47, donde los esfuerzos de sedimentación y erosión máximos son 0.23 N/m^2 , 0.59 N/m^2 , mínimos 0.04 N/m^2 , 0.15 N/m^2 , medios 0.08 N/m^2 , 0.33 N/m^2 y las velocidades de caída máxima, mínima y media son 11.95 mm/s , 4.78 mm/s y 7.17 mm/s , respectivamente.

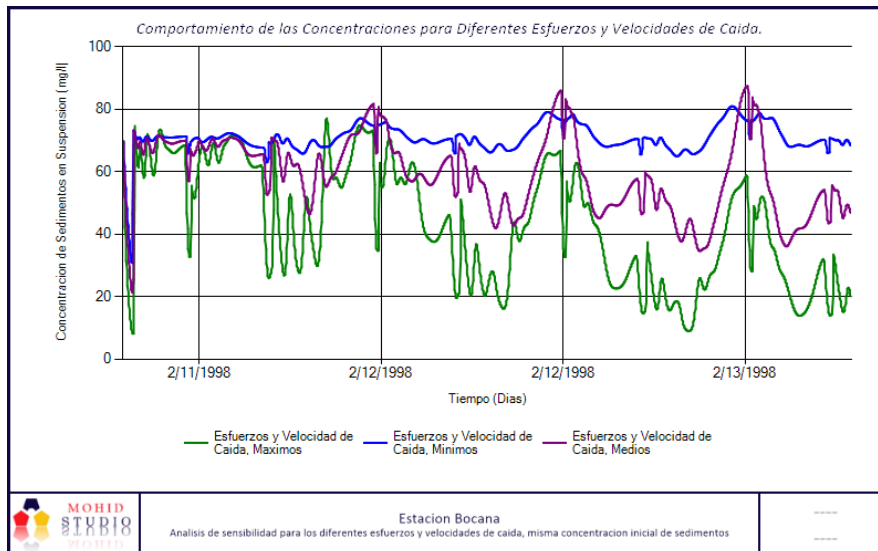


Figura 46 Comportamiento de las concentraciones para los diferentes esfuerzos y velocidades de caída en la Estación Bocana.

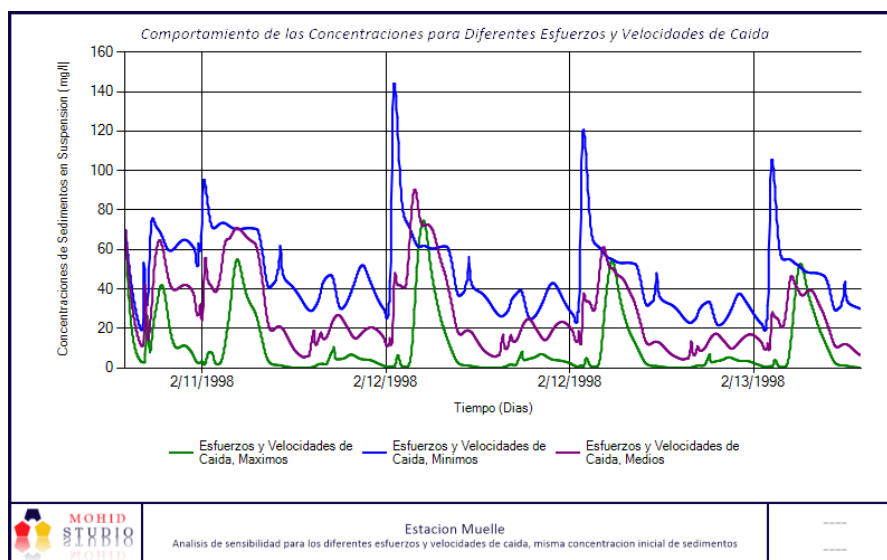


Figura 47 Comportamiento de las concentraciones para los diferentes esfuerzos y velocidades de caída en la Estación Muelle.

Los resultados obtenidos indican que las concentraciones de sedimentos en suspensión se ven afectadas significativamente cuando se tienen esfuerzos mayores y velocidades de caída de partículas altas; esto se debe a que al momento de caída de las partículas no se está presentando un proceso de resuspensión de las mismas y está dando paso a un proceso de sedimentación, el cual necesitará de esfuerzos de erosión altos para poder desprender dichas partículas del lecho.

Las diferentes condiciones iniciales de concentraciones de sedimentos consideradas en el análisis de sensibilidad para la bahía afectan de igual manera los resultados obtenidos en el modelo como se puede observar en las Figuras 48 y 49. Los valores ingresados corresponden a los descritos en el literal 8.2.4 Tabla 16.

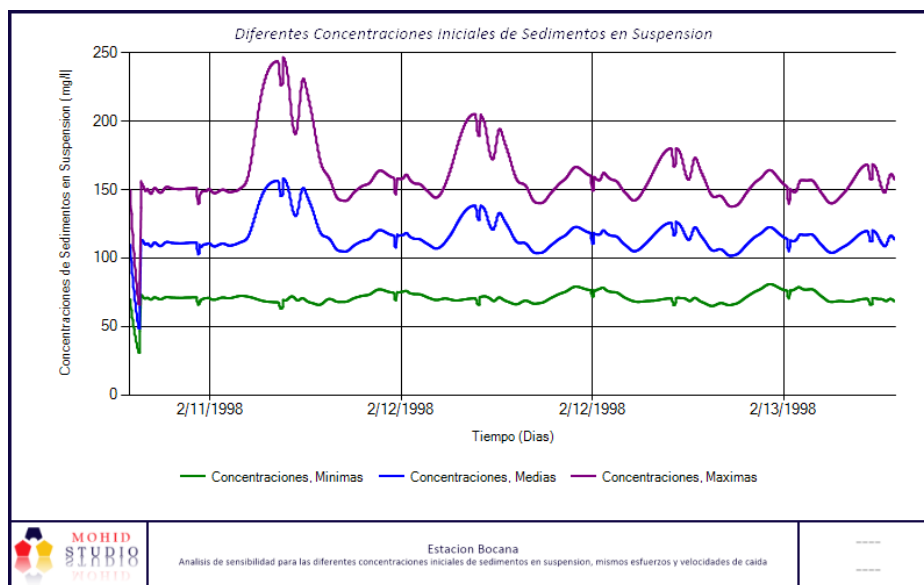


Figura 48 Análisis de sensibilidad para diferentes concentraciones iniciales de sedimentos en suspensión. Estación Bocana

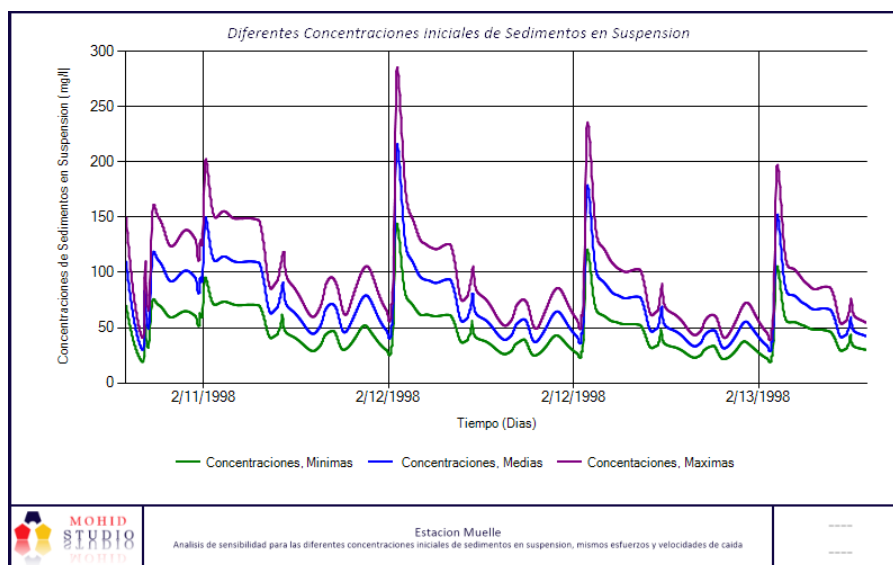


Figura 49 Análisis de sensibilidad para diferentes concentraciones de sedimentos en suspensión. Estación Muelle

En estas Figuras se puede ver como el modelo se ve afectado por las condiciones iniciales de sedimentos, dado que este siempre intenta oscilar entre los valores planteados. En este caso fueron analizadas las variaciones de las concentraciones de sedimentos en suspensión partiendo de los esfuerzos mínimos usados.

8.2.9 VERIFICACIÓN DEL MODELO

El proceso de verificación del modelo consiste en comprobar la validez de los resultados del modelo para condiciones mareales diferentes a los utilizados en la calibración. Para llevar a cabo este proceso no se modifican los valores de los parámetros usados para la calibración.

En el caso de la verificación del modelo en estudio se realizó la simulación para un ciclo de mareas vivas y muertas en el mes de noviembre del año 2001 (Figura 50), teniendo en cuenta que para este periodo se tiene información continua de los niveles de marea en la estación Mareógrafo del IDEAM.

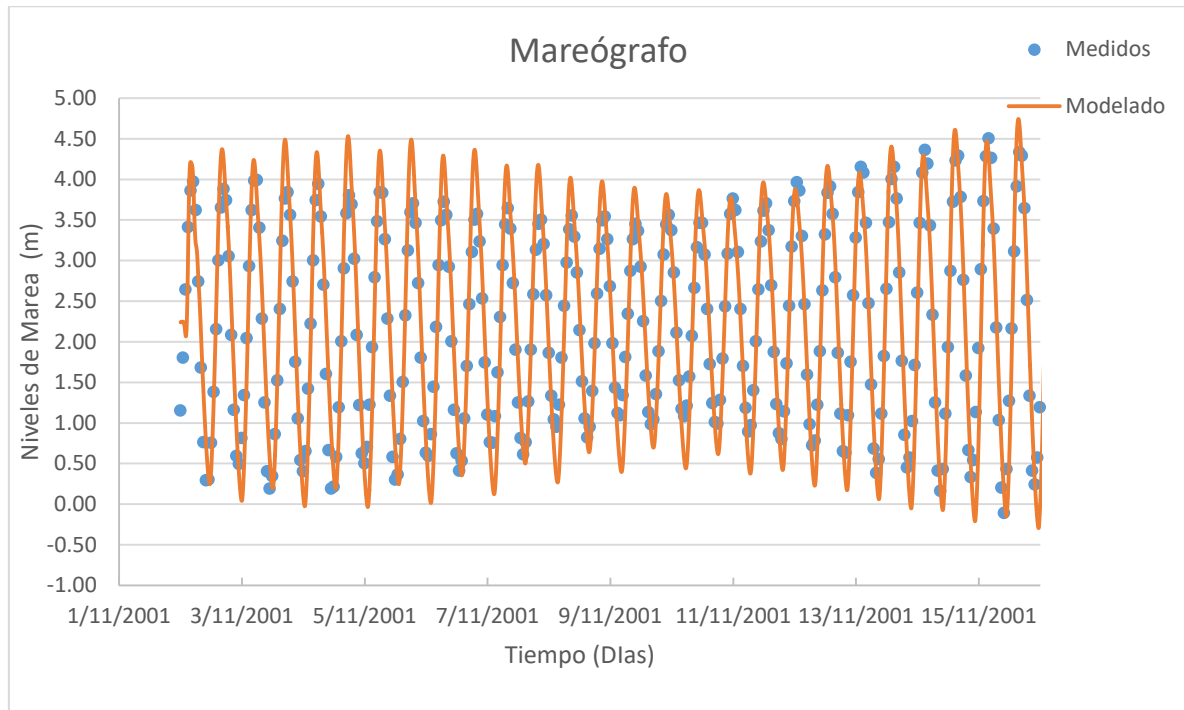


Figura 50 Verificación del modelo hidrodinámico: Niveles de marea en el Mareógrafo, medidos y modelados.

De acuerdo con los resultados de la Figura 50 se puede concluir, que los niveles de marea medidos y modelados obtenidos en el punto de medición mareógrafo se comportan de manera similar.

El proceso de verificación del modelo no se realizó para parámetros como la velocidad, dado que no se posee información continua en un tiempo diferente al de calibración. Sin embargo, los resultados obtenidos en el proceso de calibración hidrodinámica representan de manera aceptable el comportamiento de la Bahía. Para el proceso desarrollado en la calibración sedimentológica no se realizó verificación, dado que no se dispone de información continua en un tiempo diferente al de calibración.

8.3 PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES

Para simular las condiciones actuales del sistema de la bahía se consideró un periodo de 18 días correspondiente a un ciclo mareal entre los días 30/03/1998 al 16/04/1998 con un rango mareal de 5.25 m en la zona portuaria en la estación del mareógrafo. Es decir, el periodo simulado corresponde a un periodo de mareas vivas extremas; el punto de partida de dicha simulación fue determinado teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de los rangos mareales en la estación Mareógrafo, calculados aplicando la distribución de Weibull para la serie de datos de rangos de marea comprendidos entre 1980 y 2016 (ver Figura 50).

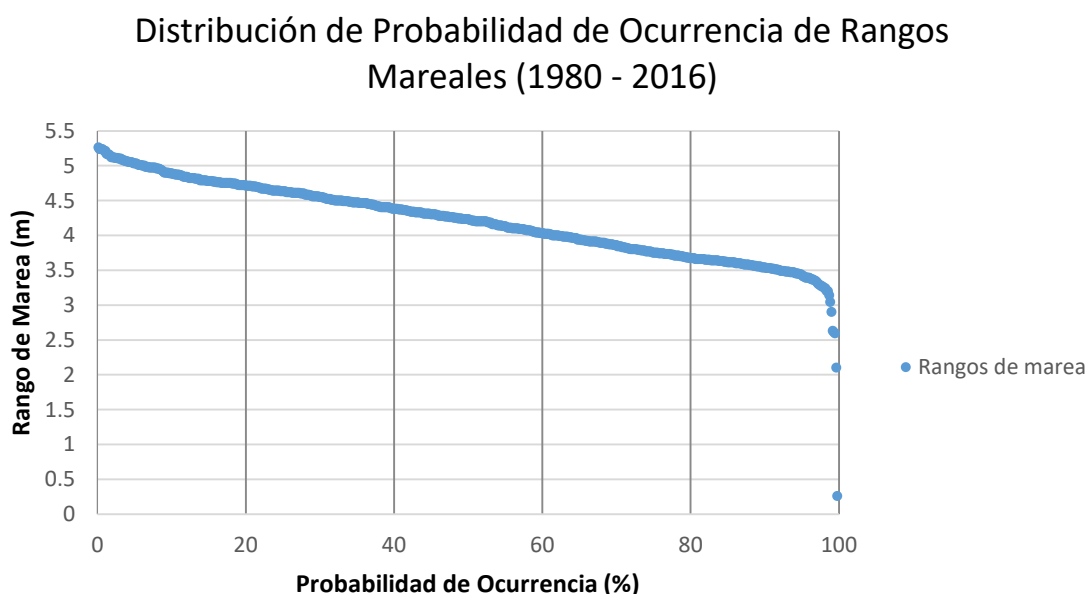


Figura 51 Distribución de probabilidad de ocurrencia de los rangos de marea en la Estación Mareógrafo (1980 – 2016)

8.3.1 ALTERNATIVAS ESTUDIADAS

La identificación de obras y medidas para minimizar el dragado de mantenimiento del canal de acceso y zonas de maniobras en la Bahía de Buenaventura se fundamentó con base a estudios realizados anteriormente por la Universidad del Valle y los resultados Hidrodinámicos y Sedimentológicos obtenidos en esta investigación.

Las medidas estructurales planteadas consisten en la construcción de diques, desviación de los ríos que aportan sedimentos en La Bahía y la posibilidad de usar dichas estructuras como zona de depósitos de sedimentos dragados.

Las medidas estructurales planteadas son las siguientes:

1. Dique direccional en frente del Terminal Marítimo de Buenaventura
2. Dique direccional en frente del Muelle Petrolero.
3. Cierre del Piñal Norte.
4. Desviación total del río Dagua.

5. Desviación parcial del río Dagua.

8.3.2 EVALUACIÓN

8.3.2.1 Dique direccional frente al Terminal Marítimo de Buenaventura

En esta alternativa se propone la implementación de un dique direccional paralelo a los muelles de la terminal de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura (ver Figura 52). El área comprende el área baja que bordea la formación rocosa llamada Las Delicias. Parte del área considerada corresponde una zona de planicie de mareas, puesto que queda al descubierto en seco durante las mareas bajas de sicigias (HASKONING; Universidad del Valle, 1995).

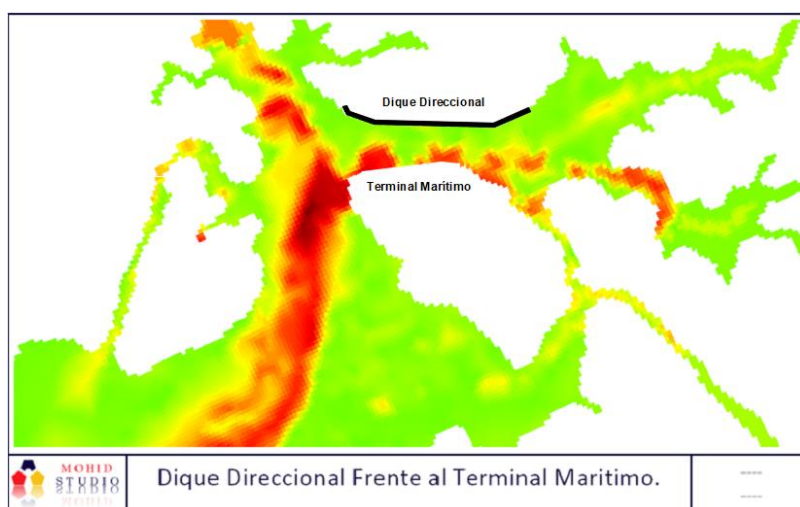


Figura 52 Alternativa estructural. Dique direccional frente al Terminal Marítimo

8.3.2.2 Dique direccional en frente del Muelle Petrolero

Se propone un dique direccional en forma triangular ubicado en frente del muelle petrolero entre el estero Aguacate y el Piñal norte (ver Figura 53). Esta área también queda en gran parte en seco durante marea baja según estudios anteriormente realizados.

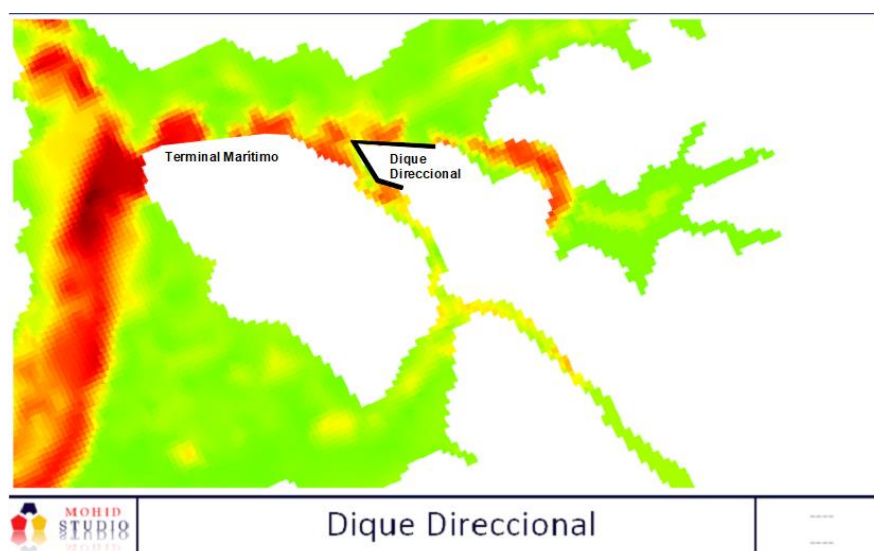


Figura 53 Alternativa estructural. Dique direccional en frente del muelle petrolero

8.3.2.3 Cierre del Piñal Norte

El cierre del Piñal tiene como finalidad evitar ingreso del flujo de sedimentos provenientes del río Dagua y el estero San Antonio hacia la zona de los muelles. El río Dagua es considerado como el contribuyente más importante en el proceso de sedimentación en la zona portuaria (ver Figura 54).

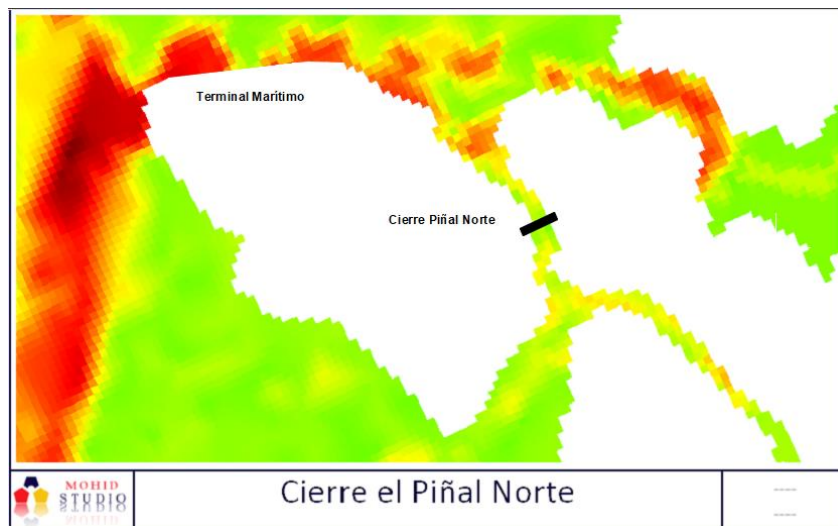


Figura 54 Alternativa estructural. Cierre del Piñal Norte

8.3.2.4 Desviación total del río Dagua

Como otra alternativa para reducir las tasas de sedimentación y, por ende, el dragado de mantenimiento se consideró el desvío total del río Dagua. Este río desemboca en la Bahía Interior de Buenaventura al sur-oeste de la Isla Cascajal. Debido a la acción de las mareas, las descargas del río Dagua pueden alcanzar la zona de los muelles del Terminal Marítimo a través del estero San Antonio y los piñales norte y sur, así como también a través de los flujos provenientes de la región nor-oriental de la isla cascajal (HASKONING; Universidad del Valle, 1995).

La desviación total del río consiste en dirigir el 100% del caudal y carga de sedimentos en dirección del estero Hondo (ver Figura 55).

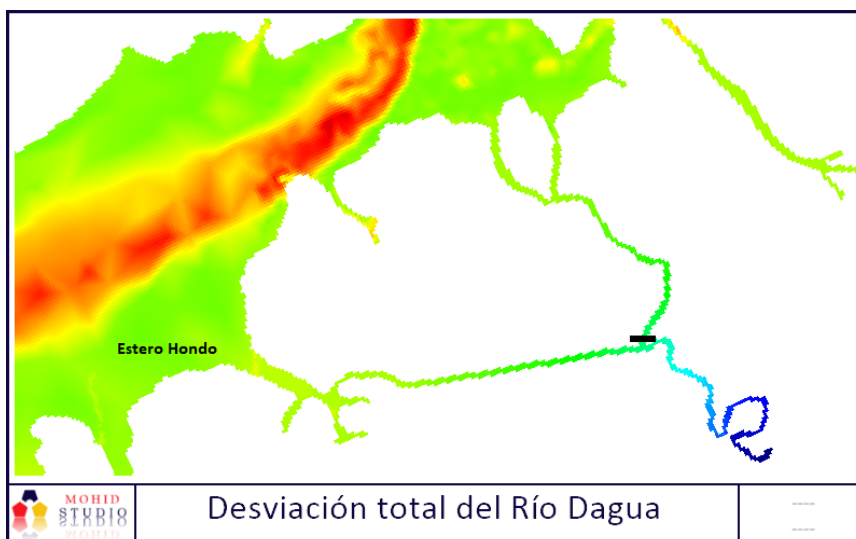


Figura 55 Desviación total del río Dagua

8.3.2.5 Desviación parcial del río Dagua

La desviación parcial del río Dagua consiste en dirigir el 50% del caudal y carga de sedimentos en dirección del estero Hondo y mantener un 50% sobre la trayectoria actual del río. Esto con el fin de reducir las tasas de sedimentación en los muelles de los terminales marítimos y los impactos ambientales y económicos que se puedan generar por una posible desviación del río Dagua; ya que al mantener un caudal sobre el cauce actual permite seguir desarrollando diferentes actividades socioeconómicas (ver Figura 56).

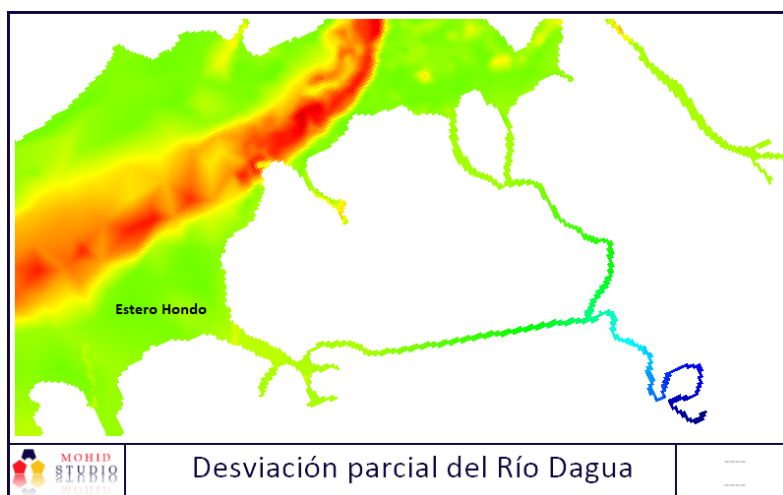


Figura 56 Desviación parcial del río Dagua

8.3.3 RESULTADO DE LA IMPLEMENTACIÓN

En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos para el comportamiento general de las velocidades, concentraciones de sedimentos en suspensión y sedimentación y erosión neta acumulada al final de un ciclo de marea aproximadamente, para toda la bahía de Buenaventura en condición actual o natural y con la implementación de las alternativas estructurales.

En la Figura 57 y Tabla 21 se indica la ubicación de los puntos de control que fueron tomados para realizar la comparación de los resultados.

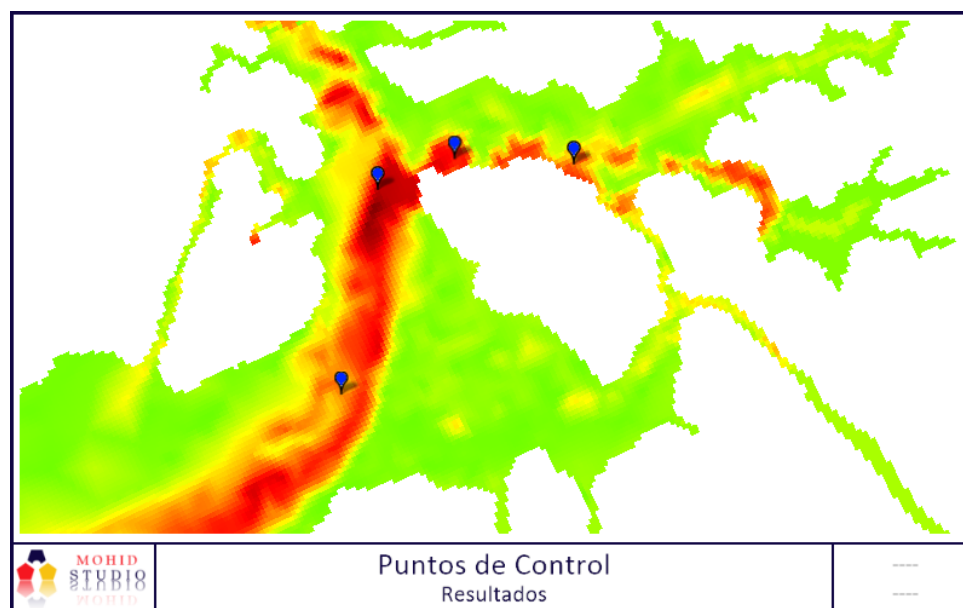


Figura 57 Puntos de control establecidos para el análisis de resultados

PUNTOS DE CONTROL		
NOMBRE	COORDENADAS	
Mareógrafo	-77.06438334	3.897846126
Muelle	-77.07734145	3.898423814
Maniobras	-77.0857094	3.895073467
Canal	-77.08967291	3.872812981

Tabla 21 Coordenadas de los puntos de control establecidos para el análisis de resultados

La comparación de resultados se verá teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Condición Natural – Batimetría sin obras.
- Obra 1 – Dique direccional en frente del Terminal Marítimo
- Obra 2 – Dique direccional en frente del muelle petrolero
- Obra 3 – Cierre de Piñal Norte
- Obra 4 – Desviación total del Río Dagua
- Obra 5 – Desviación parcial del Río Dagua

En los Anexos se pueden observar los resultados obtenidos comparando cada obra implementada vs la condición natural o actual en los diferentes estados de marea.

8.3.3.1 Velocidades

En las Figuras 58 a 61 se presentan los resultados obtenidos para la velocidad de las corrientes en los puntos de control.

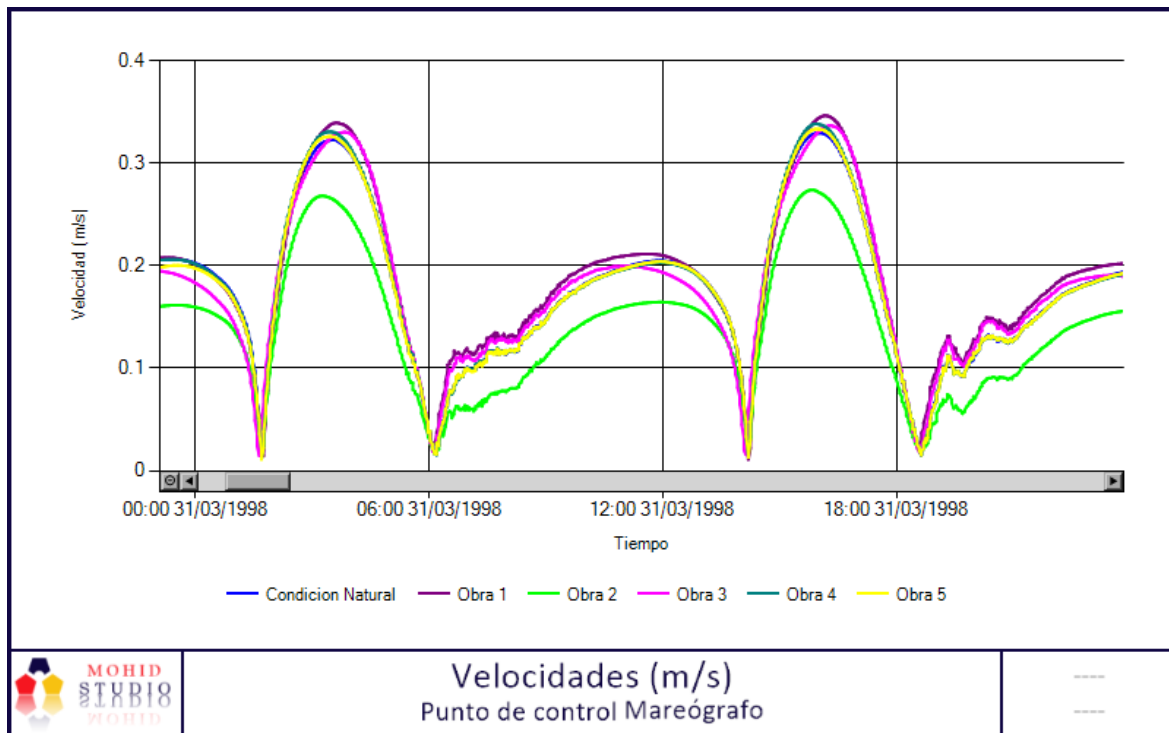


Figura 58 Velocidades obtenidas para cada condición en el punto de control Mareógrafo

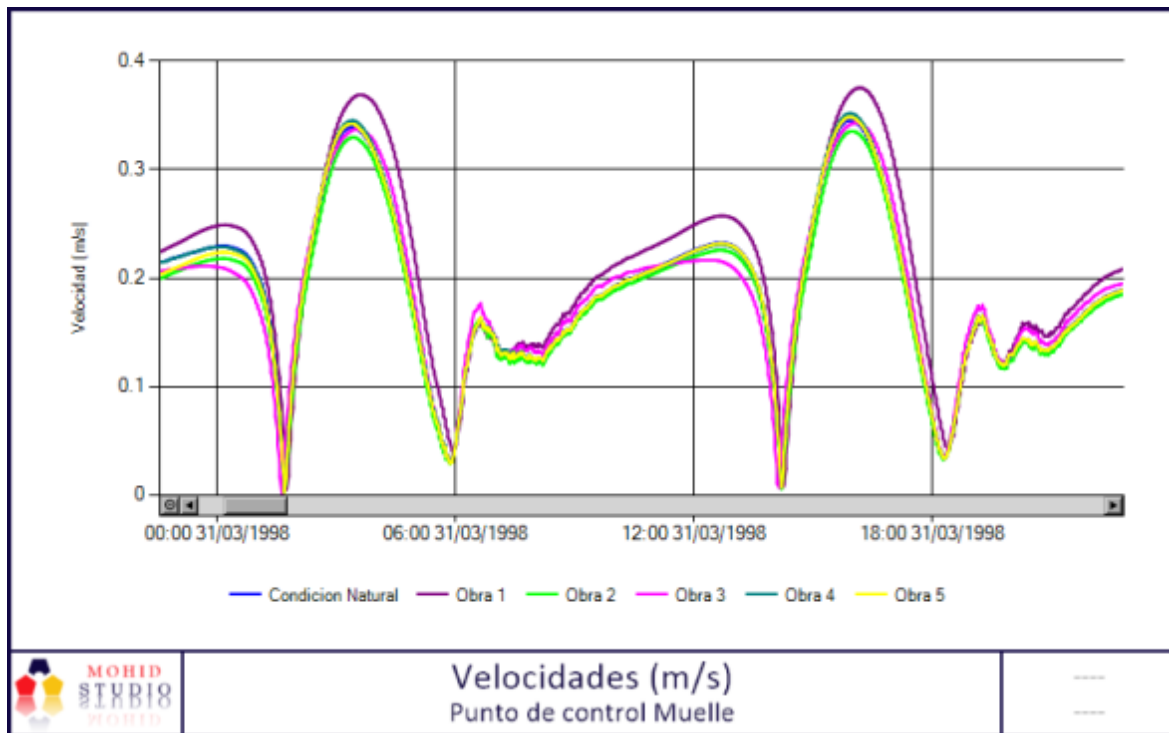


Figura 59 Velocidades obtenidas para cada condición en el punto de control Muelle

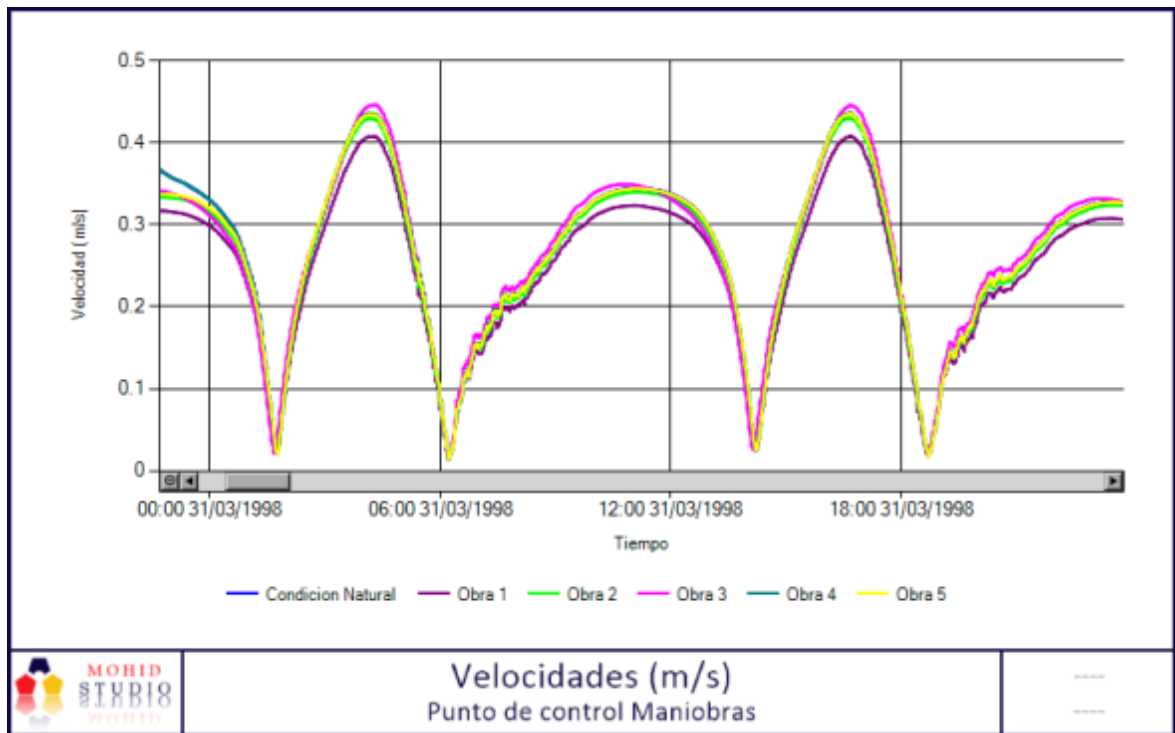


Figura 60 Velocidades obtenidas para cada condición en el punto de control Maniobras

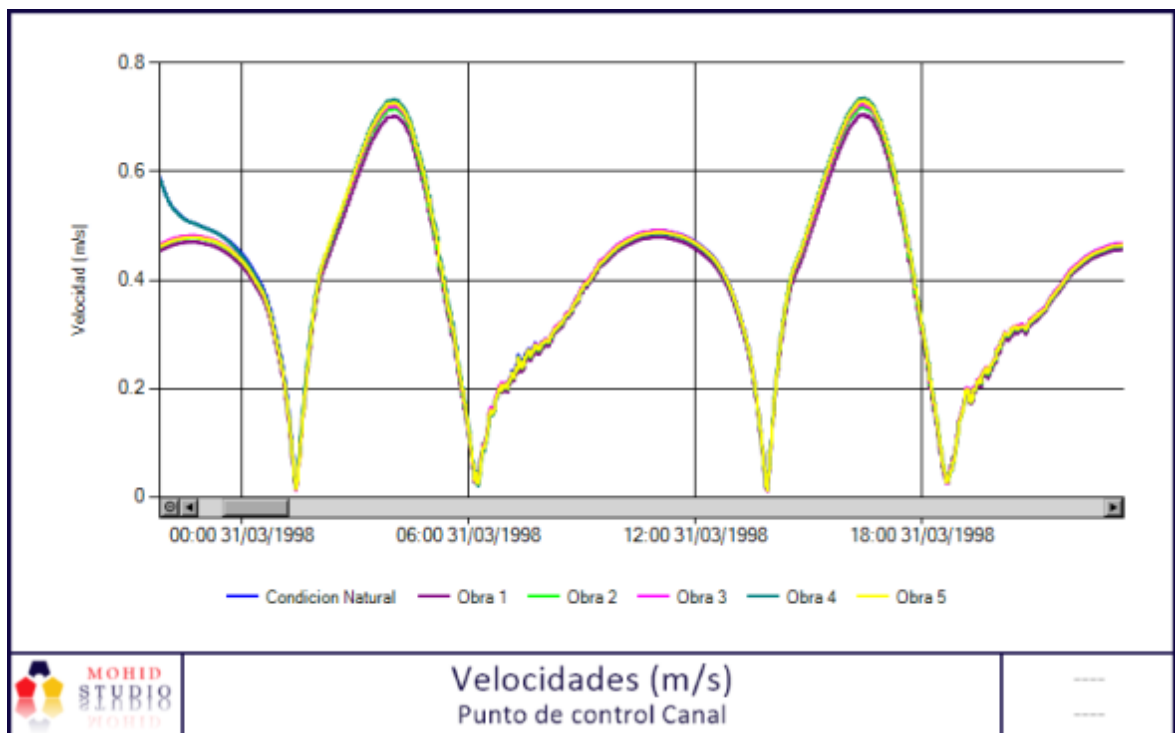


Figura 61 Velocidades obtenidas para cada condición en el punto de control Canal

8.3.3.2 Concentración de sedimentos en suspensión

En las Figuras 62 a 65 se presentan los resultados obtenidos para sedimentos en suspensión en los puntos de control establecidos.

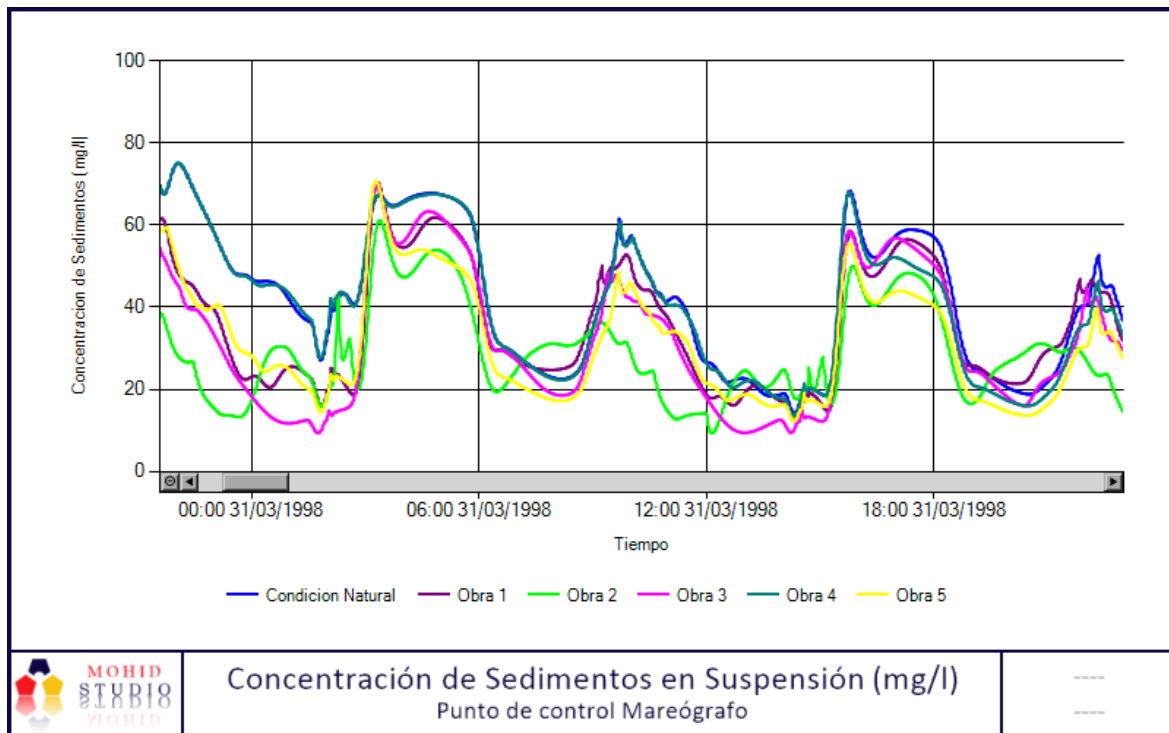


Figura 62 Concentración de sedimentos en suspensión para cada una de las condiciones, punto de control Mareógrafo.

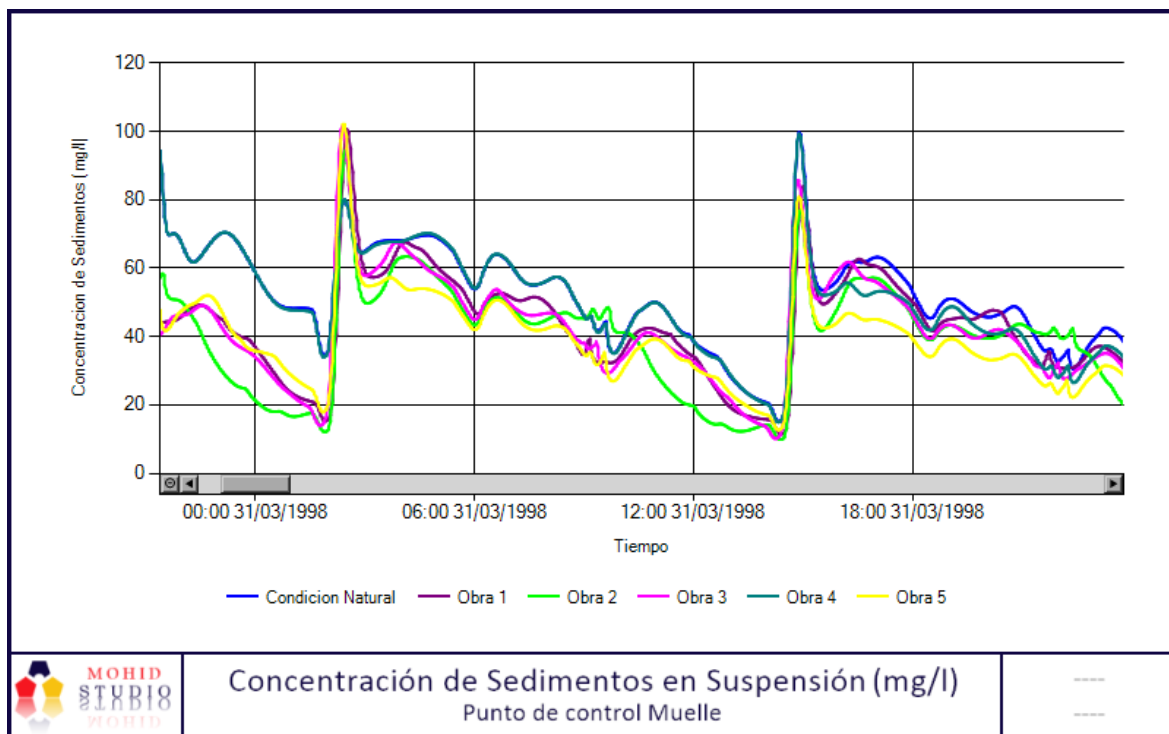


Figura 63 Concentración de sedimentos en suspensión para cada una de las condiciones, punto de control Muelle.

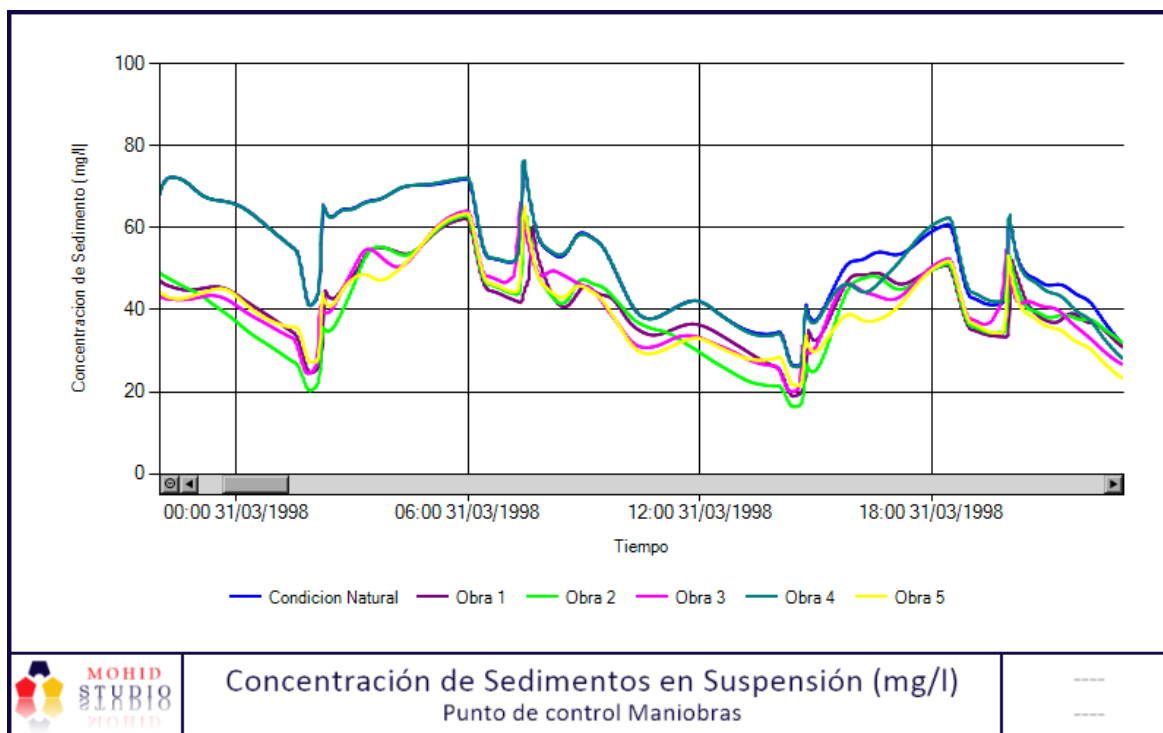


Figura 64 Concentración de sedimentos en suspensión para cada una de las condiciones, punto de control Maniobras.

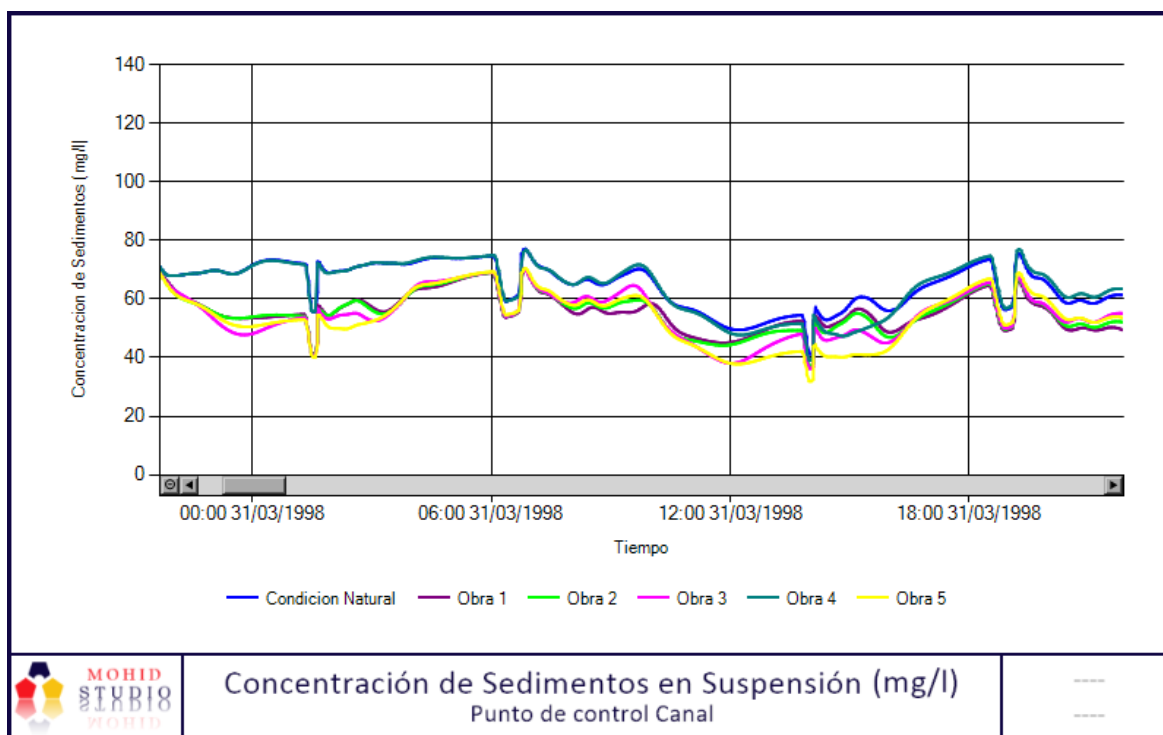


Figura 65 Concentración de sedimentos en suspensión para cada una de las condiciones, punto de control Canal.

8.3.3.3 Tasas de sedimentación

En las Figuras 66 a 69 se presentan los resultados obtenidos para las tasas de sedimentación en los puntos de control.

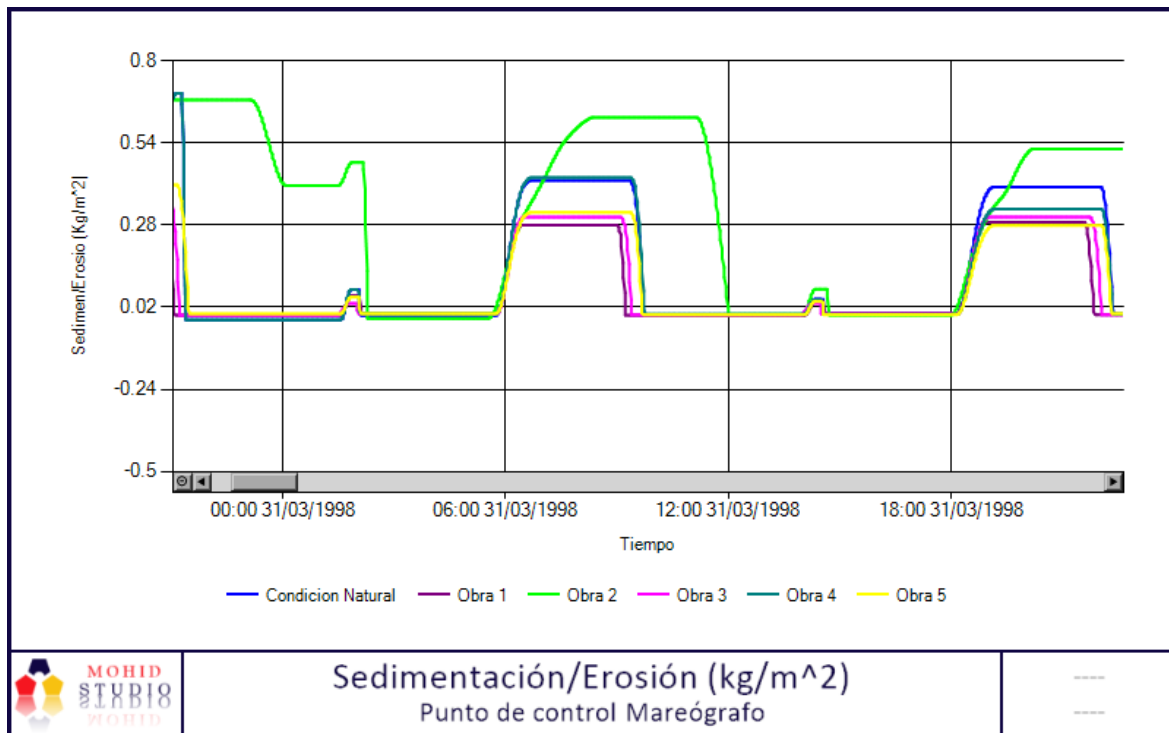


Figura 66 Tasas de sedimentación para las diferentes condiciones, en el punto de control Mareógrafo.

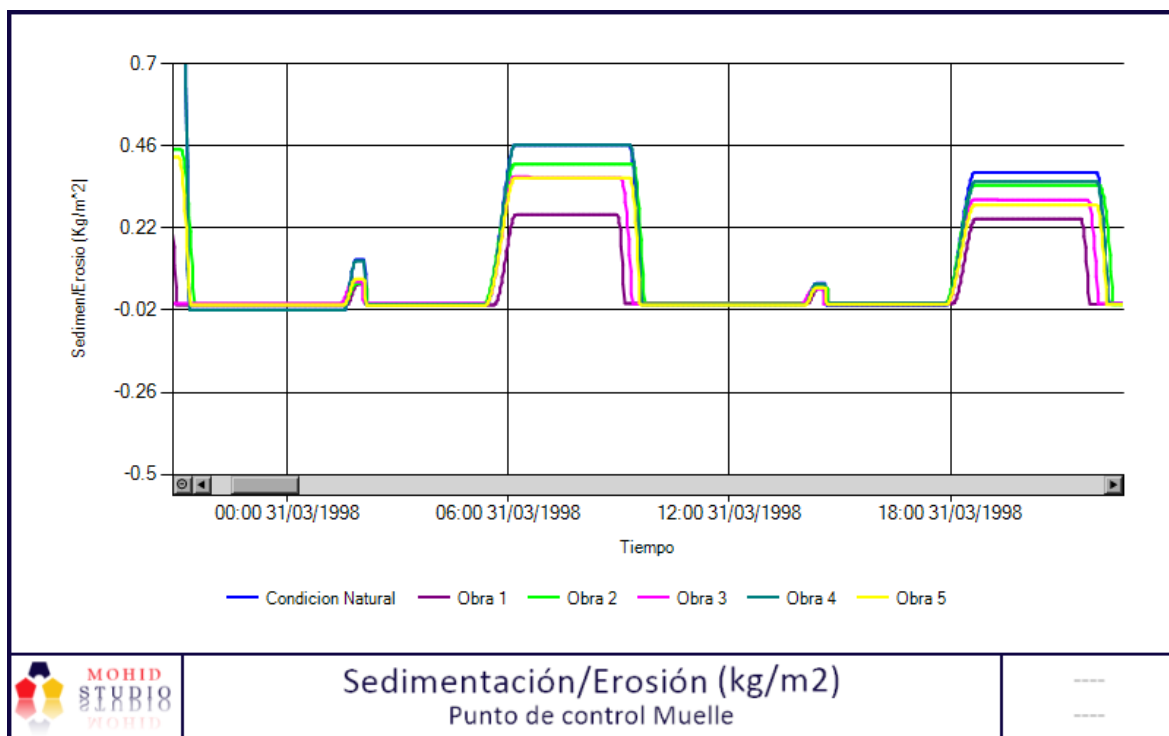


Figura 67 Tasas de sedimentación para las diferentes condiciones, en el punto de control Muelle.

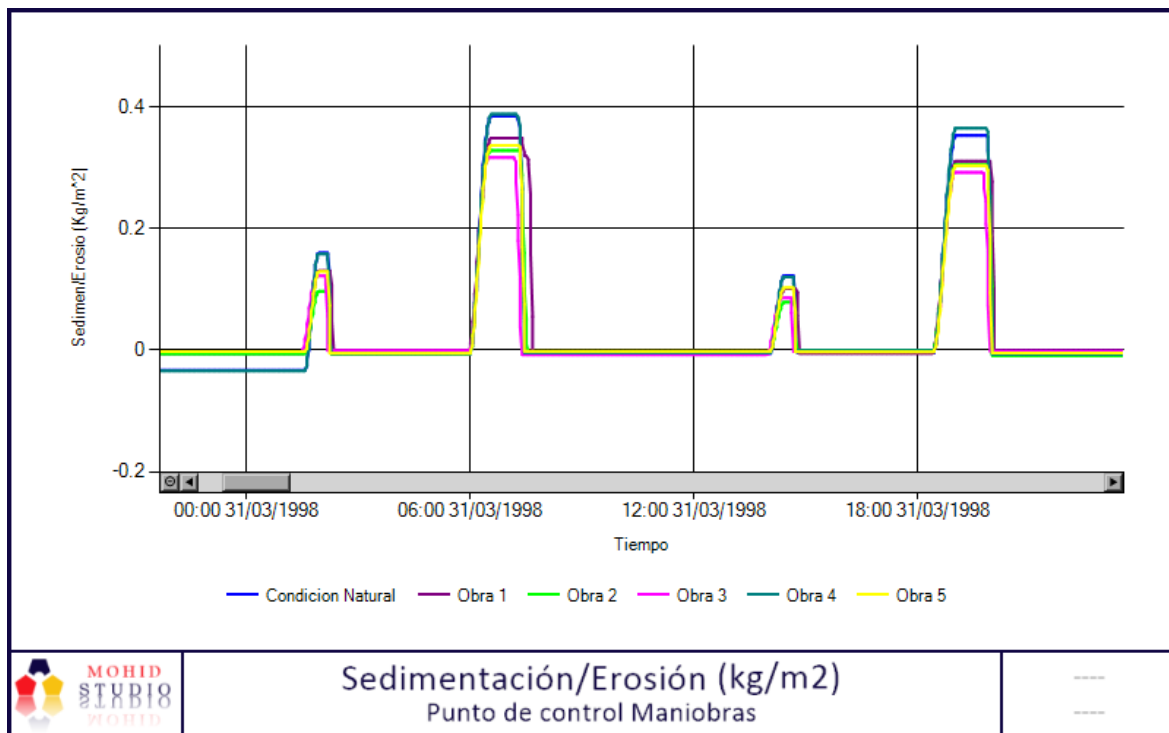


Figura 68 Tasas de sedimentación para las diferentes condiciones, en el punto de control Maniobras.

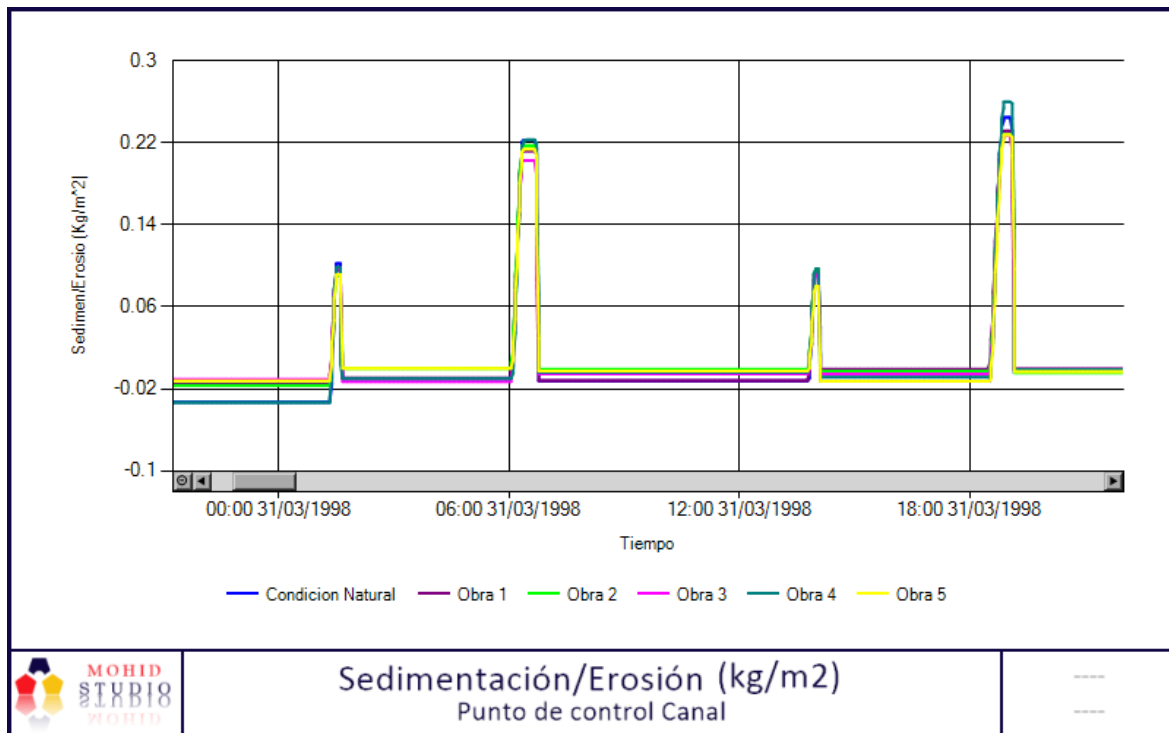


Figura 69 Tasas de sedimentación para las diferentes condiciones, en el punto de control Canal.

En las Figuras 70 y 71 se presentan las tasas de sedimentación en estado de pleamar y reflujo mareal para la condición actual o natural y las medidas estructurales implementadas.

Pleamar

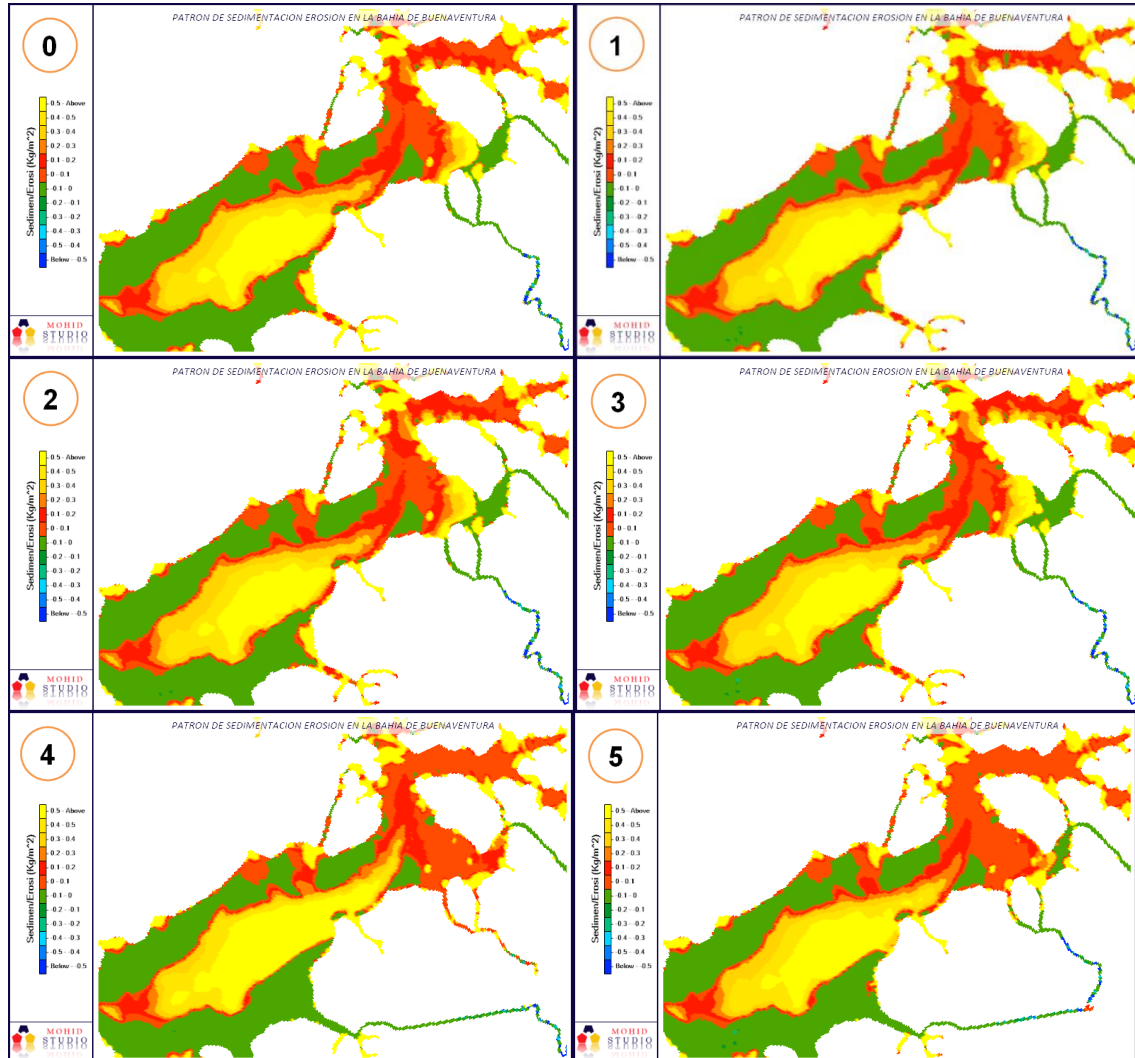


Figura 70 Tasas de Sedimentación Erosión en la Bahía de Buenaventura. 0 - Condición Natural; 1 – Dique direccional frente al Terminal Marítimo; 2 – Dique direccional frente al muelle al Muelle Petrolero; 3 – Cierre del Piñal Norte; 4- Desviación Total del Río Dagua; 5 – Desviación Parcial del Río Dagua.

Reflujo

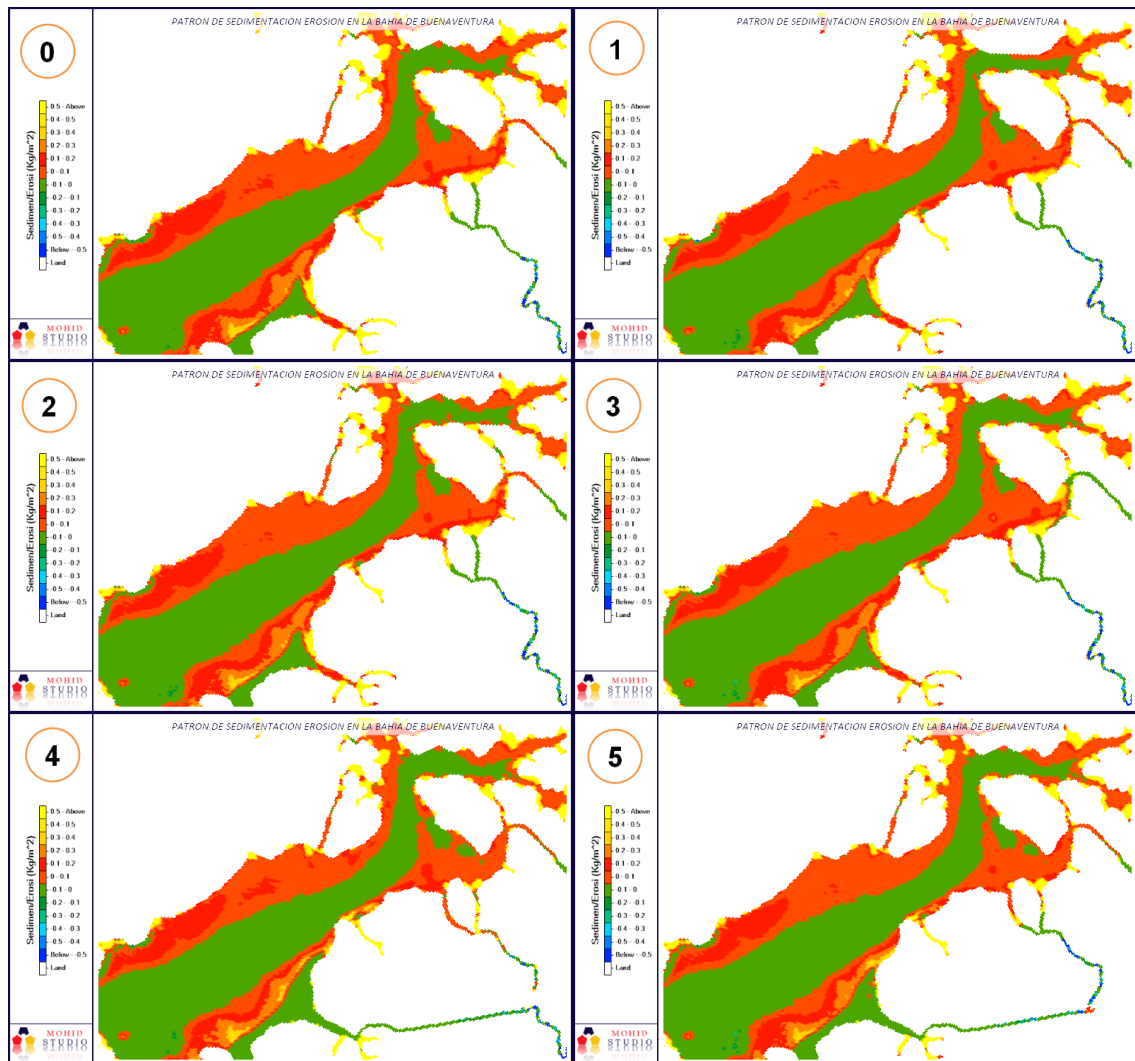


Figura 71 Tasas de Sedimentación Erosión en la Bahía de Buenaventura. 0 - Condición Natural; 1 – Dique direccional frente al Terminal Marítimo; 2 – Dique direccional frente al muelle al Muelle Petrolero; 3 – Cierre del Piñal Norte; 4- Desviación Total del Río Dagua; 5 – Desviación Parcial del Río Dagua.

8.4 ANÁLISIS DE COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES

Se realizó el análisis comparativo de los resultados alcanzados para la condición natural (o actual) y la condición modificada cuando se implementan las obras propuestas en la Bahía. De esta manera es posible estimar los efectos inducidos en el sistema estuarino, principalmente en las zonas de muelles y de maniobras y en el canal de acceso debido a la construcción de las obras.

Es preciso indicar que tanto para la condición natural o actual como para las diferentes alternativas propuestas, las simulaciones mostraron idéntico comportamiento sedimentológico en el sector comprendido entre Isla Cangrejo y la entrada de la Bahía: en la zona del canal de navegación se observan procesos erosivos mientras que en las zonas costeras y de confluencia de los ríos afluentes y esteros se observan procesos de sedimentación.

8.4.1 CONDICIÓN NATURAL VS CONDICIÓN MODIFICADA MEDIANTE CONSTRUCCIÓN DE DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL TERMINAL MARÍTIMO DE BUENAVENTURA

La simulación de la implementación de un Dique direccional frente al Terminal Marítimo de Buenaventura arrojó genera los siguientes resultados:

Las velocidades en los puntos de control mareógrafo y muelle con relación a la condición natural se incrementaron muy ligeramente; los incrementos se encuentran entre 0.02 y 0.04 m/s para el estado de refluo y entre 0.01 y 0.02 m/s para estado de flujo. Este incremento se debe a la reducción de la sección hidráulica que se encuentra entre el Terminal Marítimo y la zona de construcción del Dique direccional.

En los puntos de control maniobra y canal ocurre lo contrario, las velocidades se ven reducidas levemente, teniendo en cuenta que puede ocurrir un ligero represamiento de las aguas al encontrar una sección algo más estrecha por la cual ingresar.

El patrón de las corrientes al implementar la obra refleja que durante las mareas entrante y saliente (flujo y refluo) el flujo se concentra mejor a lo largo del muelle; durante el cambio de las mareas altas y bajas se observan remolinos en la zona de muelles. Se consideró que estos remolinos no constituyen un problema para la navegación pues, las velocidades de las corrientes son bajas.

Las concentraciones de sedimentos en suspensión disminuyen con respecto a la condición actual o natural en los cuatro puntos de control. Las reducciones no son muy significativas, del orden de 10 mg/l para un ciclo mareal.

Las concentraciones de sedimentos en suspensión muestran que en los cambios de marea saliente (reflujo) a marea entrante (flujo), los sedimentos provenientes del Río Dagua pueden alcanzar el Terminal Marítimo.

Las tasas de sedimentación obtenidas por la implementación del Dique Direccional en los puntos mareógrafo y muelle presentan una reducción que oscila entre 50 y 150 g/m² para el estado de pleamar; para el estado de bajamar se presentan reducciones poco relevantes a favor de la condición modificada. Esta reducción en las tasas de sedimentación se asocia al incremento de las velocidades en los puntos de control generadas por la reducción de la sección hidráulica de la zona.

En los puntos de control Canal y Maniobras las tasas de sedimentación presentan una reducción poco significativa respecto a la condición natural; esto debido que los valores de velocidad y concentración de sedimentos son muy cercanos a los de la condición natural.

8.4.2 CONDICIÓN NATURAL VS CONDICIÓN MODIFICADA MEDIANTE CONSTRUCCIÓN DE UN DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL MUELLE PETROLERO

La simulación considerando la construcción de un Dique direccional frente al muelle petrolero arrojó los siguientes resultados:

Las velocidades en reflujo resultan afectadas negativamente en el punto de control Maniobras, observándose una reducción de aproximadamente 0.05 m/s. Las velocidades en condición natural se encuentran cercanas a los 0.33 m/s en reflujo y 0.2 m/s en flujo, y en condición modificada las velocidades son 0.27 m/s para el estado de reflujo y 0.15 m/s para el flujo.

Este fenómeno de reducción se puede explicar teniendo en cuenta que la construcción del Dique direccional crea un canal entre el Terminal Marítimo y la zona del Piñal Norte, casi paralelo a las corrientes principales que circulan en frente del Terminal Marítimo evitando que ese flujo de agua ingrese.

Por otra parte, las velocidades obtenidas en los puntos de control Canal, Muelle y Maniobras, para la condición modificada son similares a la condición natural o actual.

El patrón de flujo se concentra principalmente frente al terminal marítimo, pero en la zona del muelle petrolero sólo se presentan líneas de flujo durante pleno llenante y vaciante, es decir, en el periodo de corrientes máximas; resultado semejante fue obtenido por HASKONING y la Universidad del Valle (1995).

Las concentraciones de sedimentos en suspensión obtenidas por la implementación de la obra muestran claramente una reducción en los puntos mareógrafo y muelle; las reducciones son cercanas a los 10 mg/l en los estados de flujo, pleamar y bajamar. En el reflujo mareal las concentraciones arrojadas para la condición modificada tienden a aumentar en comparación con la condición natural.

En los puntos maniobras y canal se observa una disminución en la concentración de sedimentos en suspensión. Las concentraciones de sedimentos en suspensión en el caso de construir un dique frente al muelle petrolero son muy similares a las obtenidas con la posible implementación del Dique direccional frente al terminal marítimo.

Las tasas de sedimentación obtenidas para la condición modificada en los puntos de control muelle, canal y maniobras presentan una leve disminución con respecto a la condición actual o natural. Las reducciones obtenidas en estos puntos de control se encuentran entre 30 y 50 g/m².

Para el punto de control mareógrafo las tasas de sedimentación se incrementaron significativamente; los incrementos para el escenario de mareas vivas oscila entre 100 y 250 g/m², mostrando que la escasa circulación de las aguas provoca una decantación de los sedimentos suspendidos.

8.4.3 CONDICIÓN NATURAL VS CONDICIÓN MODIFICADA MEDIANTE EL CIERRE DEL PIÑAL NORTE

La simulación del posible cierre del Piñal Norte arrojó los siguientes resultados:

Las velocidades de las corrientes obtenidas en los diferentes puntos de control no resultan modificadas significativamente con respecto a las velocidades estimadas para la condición actual o natural.

En los puntos mareógrafo, muelle y maniobras se observa una pequeña variación, siendo las velocidades para la condición modificada un poco mayores a las de la condición natural, oscilando entre 0.3 y 0.5 m/s en reflujo mareal y entre 0.2 y 0.3 m/s en flujo mareal. En el punto de control canal, las velocidades obtenidas para las dos condiciones tienen un comportamiento similar.

Como era de esperarse las corrientes provenientes del Estero San Antonio se dirigen completamente hacia el sector sur de la Isla Cascajal.

Debido al cierre del Piñal Norte las concentraciones de sedimentos en suspensión se reducen en todos los puntos de control con relación a la condición actual; dado que se evita el ingreso de los sedimentos provenientes del estero San Antonio y del Río Dagua. Las reducciones son cercanas a los 10 mg/l tanto en el flujo como en el reflujo mareal; en las pleamares y bajamares las diferencias son cercanas a 5 mg/l.

Las tasas de sedimentación al implementar el cierre del Piñal Norte se reducen en comparación con la condición natural. Los puntos de control más cercanos al terminal marítimo de Buenaventura como maniobras, muelle y mareógrafo son aquellos que presentan reducciones en las tasas pasando, en promedio, de 400 g/m² a 300 g/m² en pleamar, mientras que en bajamar la disminución es cercana a los 100 g/m².

Esta variación en la tasa de sedimentación se debe a las bajas concentraciones de sedimentos en suspensión en la zona de estudio, debido al cierre del Piñal norte. Esto se genera independientemente de que la variación de las velocidades no fuera significativa.

En los flujos entrantes y salientes se puede observar sedimentación en la zona cercana al Piñal Norte, Sur y en la zona sur de la Isla Cascajal.

8.4.4 CONDICIÓN NATURAL VS CONDICIÓN MODIFICADA MEDIANTE EL DESVÍO TOTAL DEL RÍO DAGUA

La simulación de la posible desviación total del río Dagua hacia el Estero Hondo, produjo los siguientes resultados:

Las velocidades de las corrientes en los puntos de control establecidos no varían con respecto a la condición natural. Este resultado es coherente con los obtenidos en investigaciones anteriores, por cuanto el patrón de las corrientes en la bahía de Buenaventura es generado principalmente por el prisma mareal; por ello la desviación total del Río Dagua hacia el estero Hondo no genera cambios de importancia en el patrón de flujo, principalmente en la zona de estudio.

Las velocidades de las corrientes para los diferentes puntos de control oscilan entre 0.3 y 0.35 m/s en reflujo y entre 0.15 y 0.2 m/s en flujo. En la zona del canal las velocidades son mayores como es de esperarse y son cercanas a 0.7 m/s en reflujo y 0.5 m/s en flujo.

Las concentraciones de sedimentos en suspensión en la bahía y principalmente en la zona de estudio y en los puntos de control varían con respecto a la condición actual dado que, la descarga de sedimentos provenientes del Río Dagua se alejó de la zona de los terminales y la Isla Cascajal. Los resultados de las concentraciones muestran que los puntos más cercanos al terminal marítimo, como mareógrafo y muelle, presentaron disminuciones, que a lo largo de todo el ciclo mareal llegan a hacer de 20 mg/l en comparación con la condición natural.

En la zona de maniobras las disminuciones en la concentración de sedimentos en suspensión oscilaron entre 10 y 15 mg/l en comparación con la condición natural: En el punto de control Canal las concentraciones disminuyeron para el estado de bajamar, pero en estado de pleamar, las concentraciones aumentaron con respecto a la condición natural debido a que la desembocadura del Río Dagua se encuentra más cerca al canal de acceso que a la Isla Cascajal y por ende, los sedimentos aportados por este afluente se desplazaron principalmente a esta zona.

Se obtuvieron mayores concentraciones en las zonas de desembocadura del Río Anchicayá y del estero Hondo, resultado apenas lógico debido a que la descarga de sedimentos en esta alternativa se hace a través del estero Hondo.

Las tasas de sedimentación obtenidas por la implementación de la obra presentan una reducción importante en la zona del terminal marítimo; por ejemplo, en los puntos de control mareógrafo y muelle, las tasas varían entre 350 y 400 g/m² para la condición natural y entre 200 y 300 g/m² para la condición modificada en el estado de pleamar. Por el contrario, en la zona de maniobras y el canal de acceso se obtuvieron mayores tasas de sedimentación en comparación con la condición natural durante las mareas vivas.

8.4.5 CONDICIÓN NATURAL VS CONDICIÓN MODIFICADA MEDIANTE EL DESVÍO PARCIAL DEL RÍO DAGUA

La simulación del desvío parcial del río Dagua (50% del caudal y la carga de sedimentos) arrojó los siguientes resultados.

Las velocidades de las corrientes al interior de la bahía son prácticamente las mismas que se presentaron en la condición natural o actual. Esto se puede explicar por la diferencia que hay entre el volumen del prisma mareal y el volumen de agua descargada por el río Dagua.

Las velocidades de las corrientes obtenidas para el escenario de mareas vivas extremas oscilan entre 0,3 y 0,7 m/s para el estado mareal de reflujo y entre 0,2 y 0,5 m/s para el estado mareal de flujo, donde las mayores velocidades se registran en el canal de acceso.

Las concentraciones de sedimentos en suspensión considerando el desvío del río Dagua muestran una clara reducción en comparación con los resultados obtenidos en la condición natural. Por ejemplo, en los puntos de control mareógrafo, maniobras y muelle se observan reducciones que oscilan entre 10 y 20 mg/l.

El punto de control canal presenta concentraciones de sedimento en suspensión menores a la condición natural para el estado de bajamar, las diferencias se encuentran entre 5 y 10 mg/l; pero en estado de pleamar las concentraciones son similares a las estimadas para la condición actual o natural.

Las concentraciones de sedimentos en suspensión son altas en las zonas del estero Hondo, la desembocadura del río Anchicayá y delta del río Dagua y bajas en el sector del Terminal Marítimo.

Las tasas de sedimentación calculadas considerando el posible desvío parcial del río Dagua hacia el estero Hondo en los diferentes puntos de control se reducen de manera apreciable: en los puntos de control mareógrafo, muelle y maniobras muestran reducciones que pueden oscilar entre 100 y 150 g/m² en pleamar, pero en bajamar las tasas de sedimentación se encuentran cercanas a los 50 g/m² sin presentar diferencias notables entre ambas condiciones. En el punto de control del canal se puede observar que las diferencias son mínimas entre ambas condiciones y a lo largo de todo el ciclo mareal tienden a nivelarse; esto debido a que la descarga de sedimentos provenientes del Río Dagua se encuentran más cerca del canal de acceso.

Por otra parte, con el fin de estimar la altura de sedimentación en los terminales marítimos y en el canal de acceso para la condición actual o natural y la condición modificada en un periodo cuasi-quincenal de mareas vivas y muertas, fue necesario determinar la tasa de sedimentación acumulada y el peso específico del sedimento modelado. El peso específico estimado fue de $\gamma=1200 \text{ kg/m}^3$ correspondiente a lodos compuestos por la mezcla de arenas, arcillas y limos (Avilez Anaya, 1982).

En las siguientes tablas se presenta las tasas de sedimentación acumulada para cada una de las condiciones en un ciclo cuasi quincenal de mareas vivas – mareas muertas y la correspondiente altura de sedimentación.

TERMINAL MARÍTIMO DE LA SOCIEDAD PORTUARIA REGIONAL DE BUENAVENTURA		
MEDIDAS ESTRUCTURALES	TASA DE SEDIMENTACIÓN (Kg/m ²)	ALTURA DE SEDIMENTACIÓN (m)
CONDICIÓN NATURAL O ACTUAL	52.74	0.044
DESVIACIÓN TOTAL DEL RÍO DAGUA	31.24	0.026
DESVIACIÓN PARCIAL DEL RÍO DAGUA	34.79	0.029
DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL TERMINAL MARÍTIMO	50.34	0.042
DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL MUELLE PETROLERO	51.9	0.043
CIERRE DEL PIÑAL NORTE	43.76	0.036

Tabla 22 Tasas de sedimentación en el Terminal Marítimo de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura para un ciclo cuasi-quincenal de mareas vivas extremas.

MUELLE PETROLERO		
MEDIDAS ESTRUCTURALES	TASA DE SEDIMENTACIÓN (Kg/m ²)	ALTURA DE SEDIMENTACIÓN (m)
CONDICIÓN NATURAL O ACTUAL	32.57	0.027
DESVIACIÓN TOTAL DEL RÍO DAGUA	19.55	0.016
DESVIACIÓN PARCIAL DEL RÍO DAGUA	22.43	0.019
DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL TERMINAL MARÍTIMO	23.92	0.020
DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL MUELLE PETROLERO	41.7	0.035
CIERRE DEL PIÑAL NORTE	31.75	0.026

Tabla 23 Tasas de sedimentación en el Muelle Petrolero para un ciclo cuasi-quincenal de marea vivas extremas

CANAL DE ACCESO		
MEDIDAS ESTRUCTURALES	TASA DE SEDIMENTACIÓN (Kg/m ²)	ALTURA DE SEDIMENTACIÓN (m)
CONDICIÓN NATURAL O ACTUAL	7	0.006
DESVIACIÓN TOTAL DEL RÍO DAGUA	9	0.008
DESVIACIÓN PARCIAL DEL RÍO DAGUA	8	0.007
DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL TERMINAL MARÍTIMO	6.65	0.006
DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL MUELLE PETROLERO	6.65	0.006
CIERRE DEL PIÑAL NORTE	6.55	0.005

Tabla 24 Tasas de sedimentación en el Canal de Acceso para un ciclo cuasi-quincenal de marea vivas extremas

9 CONCLUSIONES

En la presente investigación se plantearon y evaluaron, mediante la modelación matemática, diferentes medidas estructurales orientadas a reducir las tasas de sedimentación en las zonas de los terminales marítimos existentes actualmente en la Bahía de Buenaventura. Las principales conclusiones del estudio son las siguientes:

9.1 *CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA Y SEDIMENTOLÓGICA DE LA BAHÍA*

- La bahía de Buenaventura presenta características estuarinas, con procesos fluvio-marítimos dependientes de las descargas fluviales, las corrientes marinas y los vientos, que a su vez determinan cambios periódicos en sus geoformas.
- La interacción de las mareas, las corrientes mareales, el oleaje, las descargas de los ríos, los vientos y las formas del fondo marino y orillas establecen una hidrodinámica compleja. Lo mismo ocurre con el transporte y dispersión de los sedimentos y otras sustancias que llegan a la bahía a través de sus afluentes y vertimientos domésticos, agrícolas e industriales.
- La marea en la bahía de Buenaventura es de carácter semidiurno, con un ciclo mareal aproximado de 12 horas y 25 minutos, presentando dos pleamares y dos bajamares en poco más de un día. El rango de marea es variable en el tiempo, con rangos que van desde 1,4 m en mareas muertas mínimas hasta 5,4 m en mareas vivas máximas.
- La marea en la bahía de Buenaventura presenta una pequeña amplificación en su recorrido, desde la entrada, conocida como La Bocana, hasta la Isla Cascajal, incrementándose en promedio un 9.5%, debido a la reducción de la sección hidráulica hacia el interior y la baja resistencia al flujo.
- Las corrientes del reflujo son ligeramente superiores a las corrientes del flujo. La duración de las corrientes del reflujo es más corta que la del flujo. Lo anterior, se da debido a la forma del fondo, que presenta crestas en dirección opuesta a las corrientes en el flujo y, a la leve pendiente del lecho en la bahía.
- Los mayores flujos y las máximas velocidades de la corriente se presentan en las zonas de mayor profundidad de la bahía, en donde se han generado canales naturales, esto es, en el canal de acceso al puerto y en el estero Aguadulce.
- Los sedimentos del lecho estuarino varían a lo largo de la bahía de Buenaventura, presentando desde arenas gruesas en el sector de La Bocana, hasta limos gruesos en la desembocadura de los esteros y frente a los muelles. En general, el lecho de la bahía de Buenaventura consiste en gran medida de

arenas finas y material muy fino con diámetros promedio que van desde los 0.08 mm hasta 2.0 mm.

- La concentración de sedimentos en suspensión en la bahía de Buenaventura en general es relativamente baja, con valores medios inferiores a los 200 mg/l, presentando valores mínimos de hasta 30 mg/l en el estero Aguadulce y máximos de 400 mg/l en el delta del río Dagua. La variación de las concentraciones a lo largo de la bahía obedece a la interacción de los sistemas fluvio-marítimos y a la complejidad de la hidrodinámica del estuario, así como a los altos aportes de los Ríos Dagua y Anchicayá.

9.2 MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y SEDIMENTOLÓGICA

- El área seleccionada para simular la bahía de Buenaventura fue de 1050 km², cubriendo aproximadamente 16 km de la bahía exterior y toda la bahía interior, incluyendo los esteros y ríos afluentes. El área de la malla computacional simulada tiene un total de 610*700 celdas regulares, todas de igual tamaño en las direcciones “x”, “y” (50 m x 50 m). La información disponible sobre los volúmenes oscilantes en marea máxima, la morfología de los cauces y las longitudes de la influencia mareal máxima se utilizó para la batimetría de los ríos y esteros.
- La rugosidad del lecho no es un parámetro sensible en la determinación de los niveles de agua sobre toda la bahía; por el contrario, para el cálculo de las velocidades es un parámetro ligeramente sensible.
- Las viscosidad turbulenta o de remolino no es un parámetro sensible para el cálculo de los niveles de agua. Contrariamente, para la determinación de las velocidades del flujo si es un parámetro sensible, aunque para lograr grandes variaciones es necesario variar bastante la viscosidad. Teniendo en cuenta los rangos de viscosidad evaluados, entre 5 a 60 m²/s.
- Las mareas impuestas por medio de armónicos en la frontera de mar son un parámetro fundamental en la calibración hidrodinámica; ya que dependiendo de la ubicación de la frontera las variaciones en los niveles de marea y velocidades se ven altamente modificadas.
- Una calibración propiamente dicha del módulo de sedimentos (arenas finas) no fue posible debido a que la información de campo disponible es muy limitada y posiblemente menos confiable que la información hidrométrica disponible.
- Las concentraciones de sedimentos en suspensión y los patrones de sedimentación y erosión en toda la bahía es bastante sensible al tamaño de los sedimentos en suspensión y las velocidades de caída correspondientes, pues varían significativamente al incrementar el tamaño de las partículas de 0.08 mm a 0.15 mm, de acuerdo con el análisis de sensibilidad realizado.
- Las velocidades críticas, los esfuerzos críticos de sedimentación y erosión son parámetros fundamentales para el proceso de calibración sedimentológica; ya

que afectan de manera significativa los procesos de erosión y sedimentación en toda la bahía.

- La medición de las concentraciones de sedimentos en suspensión en la bahía es un parámetro importante para lograr una buena calibración sedimentológica.
- Las concentraciones de sedimentos en suspensión impuestas en la frontera de marea no resultó ser un parámetro sensible en la variación espacial y temporal de la concentración de sedimentos en suspensión en toda la extensión de la Bahía. Por el contrario, las concentraciones que se establezcan en las fronteras internas de los tributarios afecta notoriamente las concentraciones de sedimentos suspendidos en la Bahía.

9.3 ALTERNATIVAS ESTRUCTURALES

Con el fin de reducir las tasas de sedimentación en las zonas próximas a los terminales marítimos existentes en la Bahía de Buenaventura se plantearon y simularon las siguientes medidas estructurales: (i) Dique direccional en frente del Terminal Marítimo, (ii) Dique direccional en frente del muelle Petrolero, (iii) Cierre del Piñal Norte, (iv) Desviación total del Río Dagua al Estero Hondo, (v) Desviación parcial del Río Dagua al Estero Hondo.

- La desviación total del río Dagua hacia el estero Hondo se constituye en la mejor alternativa estructural por cuanto origina las menores tasas de sedimentación en los sectores de los terminales marítimos de Buenaventura. No obstante, esta medida al igual que las demás medidas estructurales estudiadas deben evaluarse rigurosamente considerando todos los posibles impactos ambientales en el sistema estuarino de la bahía.
- La siguiente en su orden, en cuanto a la magnitud de reducción de las tasas de sedimentación en la zona portuaria, son las siguientes medidas estructurales: la desviación parcial del río Dagua (50% de su caudal) hacia el estero Hondo, la construcción del Dique direccional frente al Terminal Marítimo de la Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura, el cierre del Piñal Norte y la construcción de un Dique direccional frente al Muelle Petrolero.
- Las tasas y alturas de sedimentación acumuladas en el sector del Terminal Marítimo de la Sociedad Portuaria de Buenaventura y el Muelle Petrolero durante un ciclo cuasi-quincenal de mareas vivas - mareas muertas y estimadas mediante la modelación matemática para la condición natural o actual y las diferentes medidas estructurales consideradas son las siguientes:

TERMINAL MARÍTIMO DE LA SOCIEDAD PORTUARIA REGIONAL DE BUENAVENTURA		
MEDIDAS ESTRUCTURALES	TASA DE SEDIMENTACIÓN (Kg/m ²)	ALTURA DE SEDIMENTACIÓN (m)
CONDICIÓN NATURAL O ACTUAL	52.74	0.044
DESVIACIÓN TOTAL DEL RÍO DAGUA	31.24	0.026
DESVIACIÓN PARCIAL DEL RÍO DAGUA	34.79	0.029
DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL TERMINAL MARÍTIMO	50.34	0.042
DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL MUELLE PETROLERO	51.9	0.043
CIERRE DEL PIÑAL NORTE	43.76	0.036

MUELLE PETROLERO		
MEDIDAS ESTRUCTURALES	TASA DE SEDIMENTACIÓN (Kg/m ²)	ALTURA DE SEDIMENTACIÓN (m)
CONDICIÓN NATURAL O ACTUAL	32.57	0.027
DESVIACIÓN TOTAL DEL RÍO DAGUA	19.55	0.016
DESVIACIÓN PARCIAL DEL RÍO DAGUA	22.43	0.019
DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL TERMINAL MARÍTIMO	23.92	0.020
DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL MUELLE PETROLERO	41.7	0.035
CIERRE DEL PIÑAL NORTE	31.75	0.026

CANAL DE ACCESO		
MEDIDAS ESTRUCTURALES	TASA DE SEDIMENTACIÓN (Kg/m ²)	ALTURA DE SEDIMENTACIÓN (m)
CONDICIÓN NATURAL O ACTUAL	7	0.006
DESVIACIÓN TOTAL DEL RÍO DAGUA	9	0.008
DESVIACIÓN PARCIAL DEL RÍO DAGUA	8	0.007
DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL TERMINAL MARÍTIMO	6.65	0.006
DIQUE DIRECCIONAL FRENTE AL MUELLE PETROLERO	6.65	0.006
CIERRE DEL PIÑAL NORTE	6.55	0.005

- La construcción del Dique direccional en frente del Muelle Petrolero, presento incrementos en las tasas de sedimentación en sectores contiguos a este muelle.
- Las mayores tasas de sedimentación ocurren durante las pleamares, al menos para el rango de condiciones analizado (amplitud de marea de 5.25 m).
- La posible construcción de las diferentes obras hidráulicas propuestas afectaron el patrón de flujo y las velocidades en algunos sectores de la bahía, principalmente en la zona donde se encuentran los Terminales Marítimos,

obteniéndose tasas de sedimentación menores a las presentadas en la condición natural o actual de la bahía.

- Teniendo en cuenta la simulación de un periodo cuasi-quincenal de mareas vivas – mareas muertas, la concentración de sedimentos en suspensión máxima para la condición actual o natural de la bahía de Buenaventura fue de 120 mg/l y se presentó en la zona del canal de acceso. Para las diferentes alternativas estructurales simuladas las concentraciones máximas fueron: (i) 110 mg/l para el Dique direccional frente al Terminal Marítimo de la SPRBUN; (ii) 110 mg/l para el Dique direccional frente al Muelle Petrolero; (iii) 90 mg/l para el cierre del Piñal Norte; (iv) 80 para el desvío total del Río Dagua; (v) 60 mg/l para el desvío parcial del Río Dagua.
- En síntesis, es posible afirmar a partir de los puntos de control establecidos que las medidas estructurales analizadas tienden a mitigar los efectos de la sedimentación en la Bahía de Buenaventura y principalmente en la zona portuaria.

10 RECOMENDACIONES

Considerando las limitaciones en la información de campo disponible se debieron realizar algunas simplificaciones y suposiciones durante el proceso de implementación de los modelos matemáticos hidrodinámico y sedimentológico. Debido a esto existe un cierto grado de incertidumbre en las predicciones realizadas y en los análisis correspondientes. Con el propósito de optimizar la calibración hidrodinámica aquí realizada y lograr una real calibración sedimentológica se presentan las siguientes recomendaciones:

- Se debe efectuar un programa de mediciones de campo en el cual se incluyan periodos de mareas vivas, medias y muertas. Para cada tipo de marea se deben realizar mediciones continuas y de manera simultánea en las fronteras y áreas principales de la bahía; como son las zonas de muelles, el canal de acceso, las zonas de maniobras; registrando parámetros tales como: niveles de marea, perfiles de velocidades de la corriente, perfiles de la concentración de sólidos en suspensión, patrón de flujo, etc.
- Se debe efectuar una batimetría de toda la bahía que incluya los esteros en toda su extensión y los tramos finales de los ríos tributarios hasta el límite de influencia mareal.
- Se deben adelantar investigaciones de campo y laboratorio para determinar las propiedades y características de los sedimentos existentes en la bahía, principalmente de los materiales finos cohesivos; especialmente la densidad, la velocidad de asentamiento, la granulometría, la concentración de las arenas y lodos en el lecho, los esfuerzos cortantes críticos de erosión y sedimentación, la tasa de erosión o erodabilidad del lecho. Igualmente se deben efectuar estudios sobre: la variación en el tiempo del grado de consolidación del material del lecho y la posible formación de estratos de diferentes densidades.
- Se debe medir el transporte de sedimentos en suspensión y total en los ríos tributarios de la Bahía y estimar los volúmenes de sedimentos descargados en la Bahía, principalmente durante las crecientes de los mismos. Se deberán determinar las propiedades físicas de estos sedimentos; iguales mediciones deben efectuarse a la entrada de la bahía.
- Se deben realizar mediciones de campo continuas y simultaneas, en toda la bahía durante ciclos cuasi-quincenales de mareas vivas - mareas muertas, durante los periodos de crecientes de los ríos, incluyendo las velocidades de las corrientes mareales y las concentraciones de sedimentos en suspensión.
- En esta investigación los principales aportes de sedimentos a la Bahía provienen de los ríos y esteros, para próximas investigaciones se recomienda estudiar otras fuentes de sedimentos, como puede ser la erosión natural o por efectos humanos de las orillas de la Bahía, las corrientes de densidad, entre otras. Con el fin de conocer la influencia de estas fuentes en las tasas de sedimentación.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía del Municipio de Buenaventura. (2013). Plan de Ordenamiento Territorial. *Anexo 4*. Buenaventura, Colombia.
- Avilez Anaya, A. (1982). *Determinación de la capacidad de azolves del proyecto presa de almacenamiento Nuevo Tepupa*. Tesis, Universidad de Sonora, Escuela de ingeniería Civil, Mexico.
- Banco de Occidente. (2002). *Libros de la Colección del Banco de Occidente*. Recuperado el 16 de 09 de 2016, de Golfos y Bahías de Colombia: <http://www.imeditores.com/>
- Barreto, I., Ezzati, P., & Fossati, M. (2009). *Estudio Inicial del Modelo MOHID*. Reporte Tecnico RT 09-10, Universidad de la República, Instituto de Computación – Facultad de Ingeniería, Montevideo.
- Braunschweig, F., Fernandes, L., & Lourenca, F. (2012). *MOHID Studio user guide*. Lisboa, Portugal.
- CCBUN. (2016). *Cámara de Comercio de Buenaventura*. Recuperado el 29 de Junio de 2016, de <http://www.ccbun.org/articulos/documentos-y-estudios>
- El Mundo.com. (21 de 12 de 2016). *Adjudican contrato para dragado del puerto de Buenaventura*. Recuperado el 27 de 09 de 2017, de <http://www.elmundo.com/noticia/Adjudican-contrato-para-dragado-del-puerto-de-Buenaventura/43743>
- Fernandez , M. (2011). *Revisión de un Modelo Regional de Marea Astronómica Implementado sobre la Regio Suroeste del Océano Atlántico*. Tesis de Maestria en Mecanica de Fluidos Aplicada, Universidad de la Republica, Instituto de Mecanica de los Fluidos e Ingenieria Ambiental , Montevideo.
- HASKONING; Universidad del Valle. (1995). *Estudio para el Dragado de la Zona de Maniobras y Muelles del Terminal Marítimo de Buenaventura*. Informe Final , Sociedad Portuaria Regional de Buenaventura S.A, Santiago de Cali.
- HMV Consultoria ; CONCEP S.A.S. (2016). *Estudio y Diseño del Dragado de Profundización del Canal de Acceso al Puerto de Buenaventura*. Santiago de Cali: CONSORCIO DRAGADO BUENAVENTURA 2015.
- Instituto Nacional de Vías - INVIAS. (s.f.). *INVIAS*. Recuperado el 26 de 09 de 2017, de Instituto Nacional de Vías: <https://www.invias.gov.co/>
- INVEMAR. (2003). *Informe del Estado de los Ambientes Marinos y Costeros en Colombia*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives De Andreis".
- INVEMAR. (2015). *Diagnóstico y Evaluación de la Calidad de las Aguas Marinas y Costeras del Caribe y Pacífico Colombiano*. Informe Tecnico 2015, Institucion de Investigaciones Marinas y Costeras "Jose Benito Vives de Andreis", Red de Vigilancia para la Conservacion y Proteccion de las Aguas Marinas y Costeras de Colombia, Santa Marta.

- MARETEC. (2002). *MOHID Modelling System Description*. Universidad de Lisboa, Marine, Environment & Technology Center , Lisboa.
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. (30 de Julio de 2014). Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. *"Por medio de la cual se sustrae definitivamente un área de la reserva forestal del Pacífico establecida en la Ley 2 de 1959, para la construcción y operación del proyecto portuario multipropósito Puerto Solo, Localizado en la Bahía de Buenaventura"*. Colombia.
- Ministerio del Transporte. (2011). *Canales de Acceso a los Puertos a Cargo de Invias*. Instituto Nacional de Vías - INVIAS.
- Palacio Tobón, C. A. (2002). *Metodología para la Validación de Modelos Hidrodinámicos utilizando amplia información de campo: Aplicación a la Bahía Meldorf en la costa del mar del Norte Alemán (PhD Thesis)*. Tesis Doctoral, University of Antioquia, Facultad Nacional de Minas, Medellín.
- Periódico El Espectador. (25 de 02 de 2017). *Periódico El Espectador*. Recuperado el 27 de 09 de 2017, de <http://www.elespectador.com/economia/adelantan-obras-para-mejorar-el-acceso-al-puerto-de-buenaventura-articulo-681835>
- Periódico El País. (02 de 02 de 2011). *El País.com*. Recuperado el 27 de 09 de 2017
- Periódico El País. (16 de 02 de 2012). *El País.com*. Recuperado el 27 de 09 de 2017, de <http://www.elpais.com.co/valle/dragado-de-canal-de-acceso-al-puerto-de-buenaventura-esta-en-un-90.html>
- Periódico EL TIEMPO. (11 de Octubre de 2015). *US\$ 8,1 millones para el dragado en Buenaventura*. Recuperado el 15 de Junio de 2016, de <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16400207>
- Quiros J., L., & Palacios O., C. J. (2006). *Caracterización Hidrodinámica de la Bahía de Buenaventura*. Proyecto de grado, Universidad del Valle , Escuela de Ingeniería Civil y Geomatica, Santiago de Cali.
- Rojas Muñoz, J. (1997). *Obras de Dragado: Canal de Acceso al Puerto de Buenaventura*. Universidad del Valle , Valle de Cauca. Santiago de Cali: Ingeniería y Competitividad .
- Universidad del Valle. (1997). *Evaluación Hidrodinámica de la Implementación de Barreras Retenedoras Frente a la Zona de Muelles del Terminal Marítimo de Buenaventura*. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.
- Universidad del Valle. (1998). *Estudio Hidrosedimentológico del Canal de Acceso al Estero San Antonio Mediante la Implementación del Modelo Matemático MIKE21*. Santiago de Cali, Valle del cauca, Colombia.
- Universidad del Valle. (1999). *Estudio Hidrodinámico y Sedimentológico de la Bahía de Buenaventura Mediante la Implementación del Modelo Matemático MIKE 21*. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.
- Van Rijn, L. C. (1990). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. AQUA PUBLICATIONS.