



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

S E D E B O G O T Á
FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AGRÍCOLA
LABORATORIO DE ENSAYOS HIDRÁULICOS

**ALTERNATIVA DE REDUCCIÓN DEL CAUDAL EN EL
CANAL DEL DIQUE MEDIANTE ANGOSTAMIENTO DE LA
SECCIÓN POR SECTORES Y CONSTRUCCIÓN DE LA
ESCLUSA DE PARICUICA**

Informe final

Volumen I de III

Informe CM-513

Bogotá D.C., Diciembre de 2008

REGISTRO DE REVISIÓN DE DOCUMENTO No. CM-513

NOMBRE DEL PROYECTO

ALTERNATIVA DE REDUCCIÓN DEL CAUDAL EN EL CANAL DEL DIQUE MEDIANTE ANGOSTAMIENTO DE LA SECCIÓN POR SECTORES Y CONSTRUCCIÓN DE LA ESCLUSA DE PARICUICA

LISTA DE DISTRIBUCIÓN

Dos (2) copias impresas, Dos (2) copias en medio digital en formato cerrado y Dos (2) copias en medio digital en formato abierto, de este documento han sido entregadas a la CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL RÍO GRANDE DE LA MAGDALENA-Cormagdalena y una (1) al LABORATORIO DE ENSAYOS HIDRÁULICOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL-LEH-UN. Todas aquellas observaciones que resulten de su revisión y aplicación, deben ser informadas al LEH-UN para proceder a ejecutar sus modificaciones.

INSTITUCIÓN

Copia Impresa No 1 Y 2	Cormagdalena
Copia digital No. 1 y 2	Cormagdalena
Copia No 3	Biblioteca LEH-UN

ÍNDICE DE MODIFICACIONES

Índice revisión	Capítulo Modificado	Fecha de modificación	Observaciones
0		XII-2008	INFORME FINAL
1			
2			

ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN

APROBACIÓN	Número de revisión		0	1	2
	RESPONSABLE ELABORACIÓN	Nombre:	J.I.O		
		Firma:			
		Fecha:	XII-2008		
	REVISIÓN	Nombre:	L.A.C		
		Firma:			
		Fecha:	XII-2008		
	VoBo DIRECTOR DEL CONVENIO	Nombre:	R.O.O.M.		
		Firma:			
		Fecha:	XII-2008		
J.I.O.: Jaime Iván Ordoñez L.A.C. Luis Alejandro Camacho		R.O.O.M.: Rafael Orlando Ortiz Mosquera			

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE ANEXOS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	11
LISTA DE FOTOGRAFÍAS	13
INTRODUCCIÓN	14
1. ASPECTOS GENERALES	16
1.1. OBJETIVO	16
1.2. LOCALIZACIÓN	16
1.3. ANTECEDENTES	17
1.4. CONTENIDO DEL INFORME	17
2. ANÁLISIS HIDROCLIMATOLÓGICOS	18
2.1. ASPECTOS DE HIDROMETRÍA (NIVELES Y CAUDALES EN ESTACIONES HIDROMÉTRICAS)	19
2.2. MODELO ACOPLADO HIDRÁULICA –HIDROLOGÍA.....	29
2.3. MODELACIÓN DE LAS CUENCAS APORTANTES A LAS CIÉNAGAS	32
3. MODELACIÓN HIDRÁULICA.....	37
3.1. CONSIDERACIONES PARA LA MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA REDUCCIÓN DEL CAUDAL EN EL CANAL DEL DIQUE	37
3.1.1. Objetivos de la modelación matemática de reducción del caudal.....	37
3.1.2. Complejidad del sistema modelado y antecedentes de modelación	39
3.1.3. Metodología	40
3.2. ACTUALIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL CANAL DEL DIQUE	41
3.2.1. Nuevas secciones transversales y discretización hidráulica	43
3.2.2. Revisión de datos de interconexiones ciénaga-canal	47
3.2.3. Resultados del proceso de re-calibración del modelo hidráulico	48
3.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CANAL DEL DIQUE	50
3.3.1. Alternativas simuladas matemáticamente	51
3.3.2. Datos de implementación de las alternativas en el modelo matemático	55
3.3.3. Hidrogramas de caudal	55
3.3.4. Cuantificación de los efectos hidráulicos de las alternativas de disminución de caudal	56
3.3.5. Cuantificación de la carga sólida en suspensión	64
3.3.6. Cuantificación de los efectos en la calidad del agua	67
3.3.7. Cuantificación del avance de la cuña salina	68
3.3.8. Cuantificación del efecto de las alternativas en el estado limnológico de las ciénagas	72

3.3.9. Mejor alternativa para la disminución de caudal.....	72
4. ASPECTOS HIDRÁULICOS Y DE NAVEGABILIDAD	73
4.1. CONDICIONES HIDRÁULICAS.....	73
4.2. PROFUNDIDADES Y VELOCIDADES EN LOS ANGOSTAMIENTOS	76
4.3. CONDICIONES DE NAVEGABILIDAD EN LOS ANGOSTAMIENTOS.....	77
5. MODELACIÓN DE LA ZONA COSTERA	81
5.1. ALCANCE Y OBJETIVOS	81
5.2. METODOLOGÍA.....	82
5.3. DATOS E INFORMACIÓN EMPLEADA	84
5.3.1. Información secundaria	84
5.3.2. Climatología – Otras variables	90
5.3.3. Información de campo	92
5.4. MODELACIÓN.....	98
5.4.1. Malla seleccionada para la simulación.....	98
5.4.2. Calibración del modelo	101
5.4.3. Selección de casos de simulación	106
5.4.4. Resultados de la modelación numérica	116
6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS	130
6.1. ALCANCE GENERAL DE LOS TRABAJOS.....	130
6.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA	131
6.3. RESULTADOS Y LIMITACIONES DE LA MODELACIÓN MARINA.....	132
7. COSTOS DE LA ALTERNATIVA	135
7.1. GENERALIDADES	135
7.2. COSTO DE RELLENOS SELECCIONADOS	136
7.3. COSTO DE DIQUES DE CONTROL DE INUNDACIONES	137
7.4. COSTO DE LA ESCLUSA DE PARICUICA	137
7.5. COSTO DE LAS ADECUACIONES A REALIZAR EN LOS CAÑOS DE CONEXIÓN	138
7.6. OTROS COSTOS DEL PROYECTO	138
7.7. COSTO TOTAL DEL PROYECTO.....	138
8. VALORACIÓN CUALITATIVA DE IMPACTOS AMBIENTALES.....	139
8.1. EVALUACIÓN CUALITATIVA DETALLADA.....	140
8.1.1. Selección de alternativas e identificación de acciones significativas.....	140
8.1.2. Identificación y ponderación de factores ambientales	141
8.1.3. Identificación y previsión de impactos ambientales significativos	142
8.1.4. Caracterización importancia intrínseca de impactos ambientales	143
8.1.5. Resultados valoración y análisis cualitativo	144
8.2. EVALUACIÓN CUALITATIVA NO DETALLADA	150
8.2.1. Selección de alternativas	151
8.2.2. Identificación y ponderación de factores ambientales	151
8.2.3. Identificación y previsión de impactos ambientales significativos	151
8.2.4. Caracterización importancia intrínseca de impactos ambientales	152
8.2.5. Resultados valoración y análisis cualitativo	152
9. CONCLUSIONES	157
9.1. EFECTOS FÍSICOS	157
9.2. EFECTOS ECOLÓGICOS	160

9.2.1. Efectos Generales	160
9.2.2. Efectos Específicos Sobre los Ecosistemas del Delta de Barbacoas	161
9.2.3. Efectos Sobre los Ecosistemas Coralinos	162
9.3. CONCLUSIÓN GENERAL	163
10. RECOMENDACIONES	164
10.1. ASPECTOS FÍSICOS.....	164
10.2. MANEJO DE SEDIMENTOS EN LA BAHÍA DE BARBACOAS	165
10.3. ESTABLECIMIENTO DEL PLAN DE ORDENAMIENTO DEL DELTA DEL CANAL DEL DIQUE.....	165
10.4. CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA Y SOCIOECONÓMICA DEL ÁREA	166
10.5. MANEJO DE LOS SEDIMENTOS DEL CANAL DEL DIQUE	166
10.6. OTRAS RECOMENDACIONES	167
REFERENCIAS	168

LISTA DE ANEXOS

VOLUMEN II

ANEXO A: ANÁLISIS HIDROCLIMATOLÓGICOS

ANEXO B: SECCIONES TRANSVERSALES ACTUALIZADAS DEL CANAL DEL DIQUE

ANEXO C: MODELACIÓN DEL CANAL DEL DIQUE CON HEC-RAS

VOLUMEN III

ANEXO D: OBRAS ADICIONALES EN EL CANAL DEL DIQUE

ANEXO E: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA

ANEXO F: EFECTOS ECOLÓGICOS DE LA DERIVACIÓN DE AGUAS Y SEDIMENTOS
HACIA LA BAHÍA DE BARBACOAS

ANEXO G: LA NAVEGACIÓN EN EL CANAL DEL DIQUE

ANEXO H: COMENTARIOS AL PROBLEMA MEDIOAMBIENTAL Y SEDIMENTOLÓGICO

ANEXO I: ANEXOS EN MEDIO DIGITAL

ANEXO I.1.: INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA

ANEXO I.2: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Localización regional	16
Figura 2-1: Localización de las estaciones hidrométricas del Canal del Dique	20
Figura 2-2: Curvas de duración de caudales medios diarios estaciones hidrométricas en el Canal del Dique	21
Figura 2-3: Series de caudales medios mensuales en estaciones hidrométricas en el Canal del Dique y en la estación Calamar	24
Figura 2-4. Series de niveles medios mensuales en estaciones hidrométricas en el Canal del Dique	25
Figura 2-5: Histogramas de caudales medios anuales para las estaciones hidrométricas en el Canal del Dique	26
Figura 2-6: Diferencias diarias de caudales entre estaciones vecinas, período extendido de análisis 1988-1997	27
Figura 2-7: Diferencias de caudales entre estaciones Gambote e Incora para los años húmedo (1996), promedio (1993), y seco (1997). Fase II	28
Figura 2-8: Series de caudales medios diarios en las cuatro estaciones hidrométricas analizadas, período extendido de análisis 1988-1997	28
Figura 2-9: Diagrama esquemático de balance hídrico a nivel diario en cada cuerpo cenagoso	30
Figura 2-10: Series diarias de precipitación y evaporación para el espejo de agua de la Ciénaga de María La Baja, durante el período de análisis extendido 1988-1997	31
Figura 2-11: Localización de la cuenca del Arroyo Corral en la cuenca del Canal del Dique y ubicación de las estaciones meteorológicas y de caudal utilizadas en el proceso de calibración del modelo lluvia-escorrentía.....	33
Figura 2-12: Esquema de modelación en HEC-HMS para la cuenca de la Ciénaga de María La Baja.....	34
Figura 2-13: Resultados de la modelación continua con HEC-HMS para la cuenca de la Ciénaga de María La Baja, utilizando el modelo simplificado de un solo tanque para el período de simulación 1988-1997	35
Figura 3-1: Sistema complejo modelado del Canal del Dique	40
Figura 3-2: Variables de cálculo de caudal en la interconexión	47
Figura 3-3: Calibración modelo hidráulico - Periodo 1988-1991	50
Figura 3-4: Sección transversal típica de las contracciones	52
Figura 3-5: Localización de los angostamientos	53
Figura 3-6: Sección transversal km 1 – Angostamiento No. 1	53
Figura 3-7: Localización de las compuertas evaluadas en el Canal del Dique	54

Figura 3-8: Hidrogramas de caudal de las alternativas (Canal del Dique K0+00)	56
Figura 3-9: Hidrograma del caudal en la desembocadura del caño Correa	57
Figura 3-10: Hidrograma del caudal en la desembocadura del caño Matunilla	58
Figura 3-11: Hidrograma del caudal en la desembocadura del caño Lequerica	59
Figura 3-12: Hidrograma del caudal en Pasacaballos	59
Figura 3-13: Caudales de excedencia a lo largo del Canal del Dique	62
Figura 3-14: Profundidad del 50% de excedencia a lo largo del Canal del Dique	63
Figura 3-15: Carga de SST del caño Correa (Toneladas por día)	65
Figura 3-16: Carga de SST del caño Matunilla (Toneladas por día)	66
Figura 3-17: Carga de SST del caño Lequerica (Toneladas por día)	66
Figura 3-18: Concentraciones de oxígeno disuelto y coliformes totales frente a la ciénaga de Juan Gómez	68
Figura 3-19: Longitud de la cuña salina desarrollada por el Canal del Dique	70
Figura 3-20: Longitud de la cuña salina desarrollada por el Caño Lequerica	70
Figura 3-21: Longitud de la cuña salina desarrollada por el Caño Matunilla	71
Figura 3-22: Longitud de la cuña salina desarrollada por el Caño Correa	71
Figura 4-1: Canal de estrechamiento	74
Figura 4-2: Curvas de Energía Específica para el Canal Original y el Canal Contraído	74
Figura 4-3: Casos de Flujo. Canal con estrechamiento	75
Figura 4-4: Condiciones de navegación contra la corriente, Angostamiento 1	78
Figura 4-5 Condiciones de navegación contra la corriente, Sección intermedia 1-2	78
Figura 4-6: Condiciones de navegación contra la corriente, Angostamiento 2	79
Figura 4-7: Condiciones de navegación contra la corriente, Sección intermedia 2-3	79
Figura 4-8: Condiciones de navegación contra la corriente, Angostamiento 3	80
Figura 4-9: Condiciones de navegación contra la corriente, Sección Intermedia 3-E	80
Figura 5-1: Cartas náuticas utilizadas para regenerar la batimetría	84
Figura 5-2: Distribución espacial de los datos utilizados para regenerar la batimetría de la zona de estudio	85
Figura 5-3: Batimetría resultante de la interpolación de los datos	85
Figura 5-4: Predicciones de marea astronómica con los registros obtenidos del SHOM en los años 1988-1991	86
Figura 5-5: Predicciones de marea astronómica con los registros obtenidos del SHOM para tres días de registro en el año 1988	87
Figura 5-6: Ubicación de puntos de reanálisis NCEP/NCAR con respecto a la zona de estudio	89
Figura 5-7: Velocidad del viento de los datos de reanálisis utilizados para la modelación	89
Figura 5-8: Rosa de los vientos de los datos de reanálisis utilizados para la modelación	90
Figura 5-9: Ciclo diario promedio de Temperatura del aire calculado a partir de las mediciones de campo	91
Figura 5-10: Ciclo diario promedio de Humedad Relativa del aire calculado a partir de las mediciones de campo	91
Figura 5-11: Imágenes Landsat de la zona de estudio. (A):17de abril de 2006	92
Figura 5-12: Variación del nivel del mar en el periodo 15-17 de octubre de 2008	94

Figura 5-13: Velocidad de vientos medida durante la campaña de campo	94
Figura 5-14: Humedad relativa del aire medida durante la campaña de campo	94
Figura 5-15: Temperatura medida del aire durante la campaña de campo	95
Figura 5-16: Presión Atmosférica medida durante la campaña de campo	95
Figura 5-17: Radiación solar de Onda Larga medida durante la campaña de campo	96
Figura 5-18: Ubicación de los equipos de medición y distribución espacial de los perfiles levantados durante la campaña de campo	97
Figura 5-19: Campos de isovalores sobre un corte vertical construido a partir de perfiles medidos en las estaciones M1, M2, M3 y M4.....	98
Figura 5-20: Batimetrías	99
Figura 5-21: Dominio de simulación y orientación de la malla	100
Figura 5-22: Variación espacial del tamaño del tamaño de celda para la discretización del dominio de cálculo.....	101
Figura 5-23: Perfiles de salinidad simulados y medidos, estaciones X01 a X09, Oct. 18	105
Figura 5-24: Perfiles de salinidad simulados y medidos en las estaciones X01 a X09	105
Figura 5-25: Probabilidad conjunta de ocurrencia de vientos y caudales totales por las bocas Correa, Matunilla y Lequerica	108
Figura 5-26: Velocidad y dirección del viento para la época climática I.....	109
Figura 5-27: Velocidad y dirección del viento para la época climática II.....	110
Figura 5-28: Velocidad y dirección del viento para la época climática III.....	110
Figura 5-29: Velocidad y dirección del viento para la época climática IV	110
Figura 5-31: Serie sintética de marea, Febrero 28 a Marzo 20 de 1991	111
Figura 5-32: Serie sintética de marea, Septiembre 01 a 20 de 1989.....	111
Figura 5-33: Serie sintética de marea, Julio 05 a 25 de 1990	111
Figura 5-34: Serie sintética de Radiación Solar de Onda Larga durante el período Diciembre 09 a Diciembre 29 de 1990	111
Figura 5-35: Serie sintética de Radiación Solar de Onda Larga durante el período Febrero 28 a Marzo 20 de 1991	112
Figura 5-36: sintética de Radiación Solar de Onda Larga durante el período Septiembre 01 a Septiembre 20 de 1989	112
Figura 5-37: Serie sintética de Radiación Solar de Onda Larga durante el período Julio 01 a Julio 25 de 1990	112
Figura 5-38: Caudales por la Boca Caño Correa para las seis alternativas y para el período Enero 1 de 1988 a Octubre 01 de 1991	113
Figura 5-39: Caudales por la Boca de Matunilla para las seis alternativas y para el período Enero 1 de 1988 a Octubre 01 de 1991	114
Figura 5-40: Caudales por la Boca de Lequerica para las seis alternativas y para el período Enero 1 de 1988 a Octubre 01 de 1991	114
Figura 5-41: Caudales por las tres bocas para las seis alternativas y para el período Enero 1 de 1988 a Octubre 01 de 1991	115
Figura 5-42: Secuencia de la concentración de trazador y de la velocidad en superficie durante un ciclo diario en la época climática III, alternativa A1	118
Figura 5-43: Ubicación en profundidad de las líneas de concentración.....	119

Figura 5-44: Campo superficial de concentración de trazador y velocidad para las seis alternativas durante la época climática I.....	120
Figura 5-45: Campo superficial de concentración de trazador y velocidad para las seis alternativas durante la época climática II.....	121
Figura 5-46: Campo superficial de concentración de trazador y velocidad para las seis alternativas durante la época climática III.....	122
Figura 5-47: Campo superficial de concentración de trazador y velocidad para las seis alternativas durante la época climática IV	123
Figura 5-48: Avance de la pluma superficial de trazador para las seis alternativas durante la época climática I.....	124
Figura 5-49: Avance de la pluma superficial de trazador para las seis alternativas durante la época climática II.....	125
Figura 5-50: Avance de la pluma superficial de trazador para las seis alternativas durante la época climática III.....	126
Figura 5-51: Avance de la pluma superficial de trazador para las seis alternativas durante la época climática IV	127
Figura 5-52: Concentración de trazador en un punto cerca de las Islas del Rosario	128
Figura 5-53: Concentración de trazador en un punto cerca de las Islas del Rosario	129
Figura 8-1: Agresividad y/o Bondad acciones Alt 0	145
Figura 8-2: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental Alt 0.....	145
Figura 8-3: Agresividad y/o Bondad Acciones Alt2.....	146
Figura 8-4: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt2.....	146
Figura 8-5: Agresividad y/o Bondad Acciones Alt3.....	147
Figura 8-6: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt3.....	147
Figura 8-7: Agresividad y/o Bondad Acciones Alt4.....	148
Figura 8-8: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt4.....	148
Figura 8-9: Agresividad y/o Bondad Acciones Alt5	149
Figura 8-10: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt5.....	149
Figura 8-11: Comparación Agresividad y/o Bondad entre Alternativas.....	150
Figura 8-12: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental Alt1	153
Figura 8-13: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt2.....	153
Figura 8-14: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt3.....	154
Figura 8-15: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt4.....	154
Figura 8-16: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt5	155
Figura 8-17: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt6.....	155
Figura 8-18: Agresividad y/o Bondad entre Alternativas	156

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1: Resumen características de niveles y caudales medios diarios en estaciones hidrométricas analizadas. Series completas período 1984-2000	20
Tabla 2-2: Percentiles de las curvas de duración de caudales medios diarios para las estaciones hidrométricas en el Canal del Dique	22
Tabla 2-3: Resultados modelación hidrológica de cuencas aferentes a cada cuerpo cenagoso para el período extendido de simulación 1988-1997.....	35
Tabla 3-1: Descripción de los tramos de análisis en el Canal del Dique	44
Tabla 3-2: Parámetros de las Ciénagas.....	47
Tabla 3-3: Parámetros hidráulicos conexiones ciénaga - canal optimizados	48
Tabla 3-4: Resultados de calibración del modelo hidráulico	49
Tabla 3-5: Balance hídrico anual aproximado	60
Tabla 3-6: Volumen de agua que ingresa a la Bahía de Barbacoas 1988-1991	60
Tabla 3-7: Volúmenes de intercambio a través de los caños de conexión Canal -	61
Tabla 3-8: Profundidad de las ciénagas igualada o excedida el 50% del tiempo [m].....	63
Tabla 3-9: Carga promedio de sólidos en suspensión	64
Tabla 3-10: Balance de SST en el sistema	67
Tabla 3-11: Cargas de nutrientes y DBO vertida al mar en la bahía de Barbacoas	67
Tabla 3-12: Valor de excedencia del 50% de la Longitud de intrusión de la cuña salina.....	69
Tabla 3-13: Máxima longitud de la cuña salina.....	69
Tabla 4-1: Profundidades en el Primer Angostamiento	76
Tabla 4-2: Profundidades en el Segundo Angostamiento	76
Tabla 4-3: Profundidades en el Tercer Angostamiento	76
Tabla 5-1: Caudal medio por los caños en el periodo de simulación 1988-1991	88
Tabla 5-2: Caudales (m^3/s) Promedio diario mensual durante la campaña de campo.....	88
Tabla 5-3: Caudales (m^3/s) por cada boca, para cada alternativa y para las épocas I y II....	115
Tabla 5-4: Caudales (m^3/s) por cada boca, para cada alternativa y para las épocas III y IV116	116
Tabla 7-1: Volumen total de material requerido para conformar los angostamientos	135
Tabla 7-2: Costo de Rellenos Seleccionados para los angostamientos con Talud 1:1	136
Tabla 7-3: Costo de Rellenos Seleccionados para los angostamientos con Talud 1.5:1	136
Tabla 7-4: Costo de Rellenos Seleccionados para los angostamientos con Talud 2:1	136
Tabla 7-5: Costo de dragados con Talud 1:1	137
Tabla 7-6: Costo de dragados con Taludes 1.5:1 y 2:1	137

Tabla 7-7: Costo de diques de control de inundaciones.....	137
Tabla 8-1: Identificación y Selección de Acciones impactantes en cada alternativa	141
Tabla 8-2: Identificación y ponderación de Factores Ambientales.....	142
Tabla 8-3: Matriz de Identificación de Impactos	143
Tabla 8-4: Valoración características intrínsecas de impactos	144
Tabla 8-5: Identificación y Selección de Alternativas	151
Tabla 8-6: Matriz de Identificación de Impactos	152

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 3-1: Caños de interconexión y rompederos (sitios de desborde) hacia las ciénagas 42

INTRODUCCIÓN

En desarrollo del convenio Interadministrativo 1-033 de 2007, en relación con las actividades de asesoría y seguimiento durante la ejecución de las obras de control de inundaciones, la Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena “**CORMAGDALENA**”, solicitó al **LABORATORIO DE ENSAYOS HIDRÁULICOS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL (LEH-UN)**, la modelación matemática del Canal del Dique, su sistema lagunar y la zona marina de la bahía de Barbacoas.

El objetivo de este trabajo es el de apoyar la evaluación sobre la factibilidad técnica y ambiental de disminuir el caudal en el Canal del Dique mediante la reducción de su sección transversal en sectores cortos especialmente seleccionados a fin de mantener los niveles a lo largo del canal y garantizar la navegación y el intercambio de agua con el sistema lagunar periférico del Canal. Para este trabajo se modelaron matemáticamente diferentes alternativas para lograr el objetivo propuesto, y se determinó la alternativa óptima y sus características principales de ingeniería, así como su costo global. Este informe contiene la metodología seguida y los resultados obtenidos de modelación matemática de las alternativas en los diferentes componentes de hidrología, hidráulica, calidad del agua, limnología de las ciénagas, e ingeniería de costas.

Es por tanto objeto de este informe presentar y discutir los análisis hidroclimatológicos efectuados durante esta segunda fase de los estudios. Igualmente, y con el fin de mantener la consistencia en el reporte de los estudios hidroclimatológicos adelantados durante la segunda Fase, se ha considerado importante en este documento mantener la estructura del informe de la Fase I de los estudios. Así, el Capítulo 2.1 de este documento describe los análisis hidrométricos efectuados a partir de los nuevos datos hidrológicos disponibles en las cuatro estaciones ubicadas sobre el Canal del Dique (Incora, Gambote, Santa Helena I y Santa Helena II), y en la estación Calamar sobre el río Magdalena. En el Numeral 2.2 se discute el proceso de obtención de las series hidrometeorológicas extendidas, insumos del modelo acoplado hidrología-hidráulica. El numeral 2.3 describe la implementación y los resultados de la aplicación del modelo HEC-HMS para la estimación de la escorrentía diaria aportada a cada uno de los principales cuerpos cenagosos durante el período extendido de análisis 1988-1997. Finalmente, en el capítulo 9 se incluyen las conclusiones y recomendaciones de los análisis efectuados. La información primaria procesada, al igual que todos los análisis efectuados se incluyen en el *Anexo A: Análisis Hidroclimatológicos en la Cuenca del Canal del Dique Fase II*, que acompaña este informe.

Debe anotarse que en el presente documento se ha intentado limitar la presentación y discusión de los análisis realizados a los efectuados en esta segunda fase de los estudios. Sin embargo, para propósitos de contextualización de las características físicas generales de la ecorregión del Canal del Dique, y de caracterización hidroclimatológica general de la zona

de estudio, el lector interesado es remitido al informe hidroclimatológico de la Fase I, (UNLEH, 2007).

La modelación de seis alternativas estudiadas se realizó mediante el modelo matemático integrado hidráulico, de calidad del agua y ecológico del Canal del Dique y su Sistema Lagunar implementado en el proyecto CORMAGDALENA-UNAL (2007a, 2007b; Camacho *et al.*, 2008) en la plataforma SIMULINK de MATLAB (The MATHWORKS Inc, 1996) con algunas modificaciones y actualizaciones incorporadas en el presente trabajo. La modelación se realizó también con el apoyo del modelo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center- U.S. Army Corps of Engineers), implementado por la Universidad del Norte (IDEHA, 1999, 2002, 2003a, 2003b), para las condiciones de caudales bajos sin desborde lateral.

En el numeral 3.1 se presentan las consideraciones y aspectos generales de la modelación matemática de la disminución del caudal en el Canal del Dique y su Sistema Lagunar, incluyendo los antecedentes de modelación del sistema, objetivos y alcance y la metodología seguida.

En el numeral 3.2 se describen brevemente las modificaciones y actualizaciones realizadas al Modelo Matemático del Canal del Dique en el presente trabajo, y en el Capítulo 3 se presentan las alternativas de disminución de caudal consideradas y los resultados de simulación y los análisis de dichas alternativas.

Finalmente en el numeral 3.3.9 y Capítulo 9 se presentan conclusiones del análisis de los resultados y del ejercicio de modelación realizado del Canal del Dique y su Sistema Lagunar, y se recomienda la mejor alternativa, solamente **desde el punto de vista hidráulico, de calidad del agua y de limnología**, para disminuir el caudal en el sistema y reducir el ingreso de sedimentos y sólidos suspendidos totales a la Bahía de Cartagena.

En los Anexo B, C, D y E del presente Informe a su vez se incluyen los datos topobatimétricos recopilados para la actualización de la herramienta matemática, el proceso de modelación desarrollado en el programa HEC-RAS, se describen las obras complementarias consideradas y los resultados detallados de la modelación matemática del canal del Dique y el Sistema Lagunar en sus alternativas de disminución del caudal.

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. OBJETIVO

Se trata de realizar la modelación matemática del Canal del Dique, su sistema lagunar y la zona marina de la bahía de Barbacoas y la desembocadura del Caño Correa al mar, con el fin de analizar la posibilidad de reducir el caudal hacia la Bahía de Cartagena mediante angostamientos parciales de la sección transversal a lo largo del mismo.

1.2. LOCALIZACIÓN

La región del Canal del Dique está ubicada al Norte de Colombia en la margen izquierda del Río Magdalena y hace parte del sistema deltaico que forma el río en su desembocadura al mar Caribe y de la cual hacen parte los departamentos de Bolívar, Atlántico y Sucre.

Figura 1-1: Localización regional



1.3. ANTECEDENTES

En concordancia con los objetivos que se persiguen, la Universidad Nacional, (Sedes Bogotá y Medellín), adelantó el estudio de esta alternativa final de análisis para disminuir el caudal y la carga sólida hacia la Bahía de Cartagena, mediante el agostamiento de la sección del Canal en varios sectores a lo largo del mismo, y mediante la construcción de la esclusa de Paracuica, en el sector vecino a la población de El Recreo. Dado que estas acciones aumentarían los flujos hacia el mar por el Caño Correa y hacia la bahía de Barbacoas, por los caños Matunilla y Lequerica, se hizo necesario hacer una modelación de las corrientes marinas en la zona costera inmediata a la bahía de Barbacoas a fin de investigar el destino final de la carga sedimentológica que llega a esta Bahía.

1.4. CONTENIDO DEL INFORME

El presente informe contiene un recuento de las principales actividades realizadas en la modelación matemática del Canal del Dique, su sistema lagunar y la zona marina de la bahía de Barbacoas, en el periodo de agosto a noviembre de 2008. Se revisó y amplió la modelación hidroclimatológica del sistema, se realizaron varias inspecciones de campo, una campaña topo batimétrica para recolectar información relevante y necesaria para el modelo matemático y la simulación de escenarios, así como una campaña de mediciones oceanográficas en la bahía de Barbacoas. Se realizó igualmente una amplia modelación preliminar con HEC-RAS para precisar el efecto y la mejor localización de los sitios de reducción de la sección transversal del Canal del Dique y del efecto de una compuerta-esclusa aguas abajo en el sector de Paricuica.

Se utilizó la herramienta matemática de modelación del sistema Canal-Ciénagas, en SIMULINK, implementada y calibrada nuevamente con alto grado de detalle, y se realizaron simulaciones hidráulicas y de calidad del agua de diferentes escenarios y alternativas, utilizando datos hidrológicos de 10 años para producir conclusiones más contundentes sobre el efecto de los diferentes escenarios y alternativas consideradas. Finalmente, se realizó el montaje, trabajo de campo y operación de un modelo bidimensional de flujo en la zona marina y se estudiaron las corrientes dentro y fuera de la bahía de Barbacoas.

2. ANÁLISIS HIDROCLIMATOLÓGICOS

Como parte de los estudios realizados por la Universidad Nacional de Colombia – Laboratorio de Ensayos Hidráulicos (UN-LEH) durante el año 2006, (referidos en este documento como la Fase I de los estudios), y específicamente dentro de las conclusiones de los análisis hidroclimatológicos efectuados, se planteó la importancia de extender la longitud del período de análisis, (que durante la Fase I correspondió al periodo 1988-1991). Esto con el fin de dar mayor confiabilidad a los resultados obtenidos (considerando la importante variabilidad hidrológica interanual en el sistema del Canal del Dique, descrita en detalle en el informe hidroclimatológico de la Fase I, (UN-LEH, 2007)), permitir extender la calibración y validación del modelo acoplado hidrología-hidráulica-calidad-limnología, desarrollado en la Fase I, durante un período mayor de registro, y con el modelo acoplado recalibrado y validado, realizar el estudio de nuevas alternativas y escenarios de manejo hidrosedimentológico en el Canal, incluyendo alternativas de reducción del caudal.

Con este fin, se adquirió en el IDEAM información hidroclimatológica a nivel diario para el período complementario 1992-1997, de las estaciones ubicadas en la cuenca del Canal del Dique, extendiendo la información disponible durante la Fase I de los estudios. De esta forma, se han realizado estudios hidroclimatológicos detallados para el período consistente, homogéneo y extendido de análisis que corresponde a 1988-1997 (10 años). La metodología utilizada en esta segunda fase de los estudios es idéntica a la propuesta, aplicada y descrita en detalle en el informe de la Fase I, y que contempla el análisis de consistencia, calidad y homogeneidad de la información, el llenado de datos faltantes, el análisis de curvas de calibración en estaciones hidrométricas, la generación de series de variables hidrológicas y meteorológicas diarias, entre otros. Los análisis realizados y descritos en detalle en este informe fueron desarrollados con el fin de preparar las series hidroclimatológicas a nivel diario para el período 1988-1997, insumo básico para realizar la modelación acoplada hidrología-hidráulica al intervalo de cálculo del modelo hidráulico (subdiario), evaluando el balance hídrico y estableciendo los aportes ciénaga-canal o canal-ciénaga, para cada cuerpo cenagoso importante. Estas series hidroclimatológicas incluyen precipitación y evaporación sobre los espejos de agua y la cuenca aferente, y aportes de escorrentía, estimados estos últimos a partir de la aplicación continua, a nivel subdiario, del modelo matemático HEC-HMS, utilizando para ello registros diarios de precipitación y evaporación y los modelos HEC-HMS implementados y calibrados durante la Fase I de los estudios.

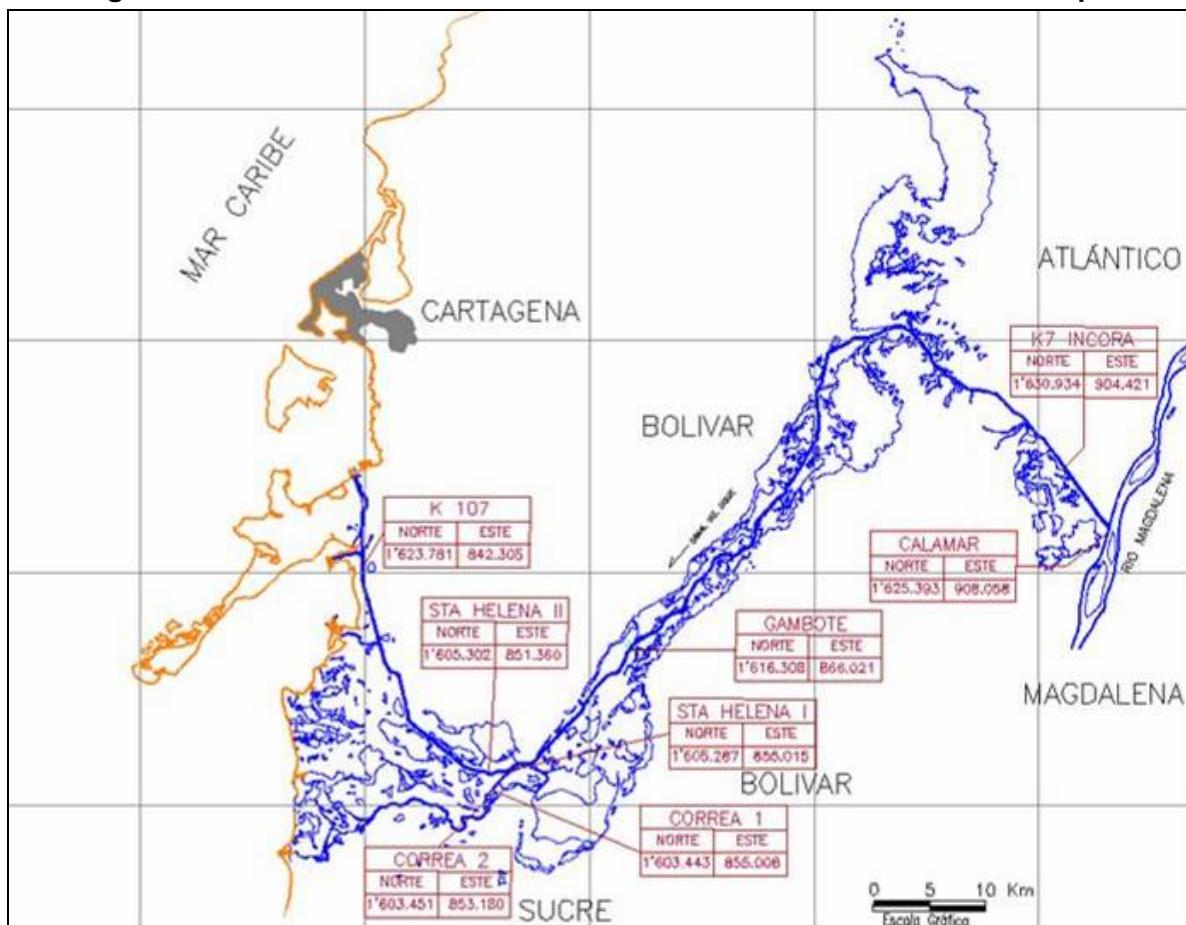
Es por tanto objeto de este numeral presentar y discutir los análisis hidroclimatológicos efectuados durante esta segunda fase de los estudios. Igualmente, y con el fin de mantener la consistencia en el reporte de los estudios hidroclimatológicos adelantados durante la segunda Fase, se ha considerado importante en este documento mantener la estructura del informe de la Fase I de los estudios.

2.1. ASPECTOS DE HIDROMETRÍA (NIVELES Y CAUDALES EN ESTACIONES HIDROMÉTRICAS)

A partir de los registros de niveles medios diarios en la estación Calamar (sobre el río Magdalena) y en cuatro estaciones hidrométricas en el Canal del Dique (Incora, Gambote, Santa Helena I y Santa Helena II, ver Figura 2-1), las cuales tienen el registro histórico más completo, no presentan problemas de flujos reversos, ni problemas en las secciones de aforo, y utilizando los datos de aforos líquidos de cada estación, suministrados por el IDEAM en la Fase I de los estudios, se obtuvieron las curvas de calibración en cada una de las cinco estaciones hidrométricas mencionadas, y a partir de estas se determinaron las series de caudales medios diarios para el período 1984-2000 (con información hidrométrica disponible) y el cual se considera como el período hidrológico relativamente homogéneo desde la última intervención importante sobre el Canal del Dique (ensanchamiento de la sección transversal y rectificación del alineamiento, ocurridas en 1984) y durante el cual el Canal ha venido alcanzando un relativo estado de equilibrio.

Debe mencionarse que durante la Fase I estos cálculos fueron realizados a partir de las series de niveles depuradas y consistentes pero con registros incompletos. Durante esta segunda fase, los análisis han sido efectuados sobre series de niveles homogéneas, completas y consistentes para el período 1984-2000. La complementación del registro faltante en cada estación se ha realizado a partir del análisis de diagramas bilineales y ecuaciones lineales de regresión entre estaciones hidrométricas vecinas, con coeficientes de determinación en todos los casos mayores de 0.93 (ver Anexo A). Debido a lo anterior, existen ligeras diferencias entre los resultados presentados en el informe de Fase I y los que se sintetizan a continuación en la Tabla 2-1, en donde se resumen las características de niveles y caudales medios en las cinco estaciones hidrométricas, y en la Figura 2-2 y la Tabla 2-2, en donde se resumen las características de las curvas de duración de caudales para las mismas estaciones y el período señalado.

Figura 2-1: Localización de las estaciones hidrométricas del Canal del Dique

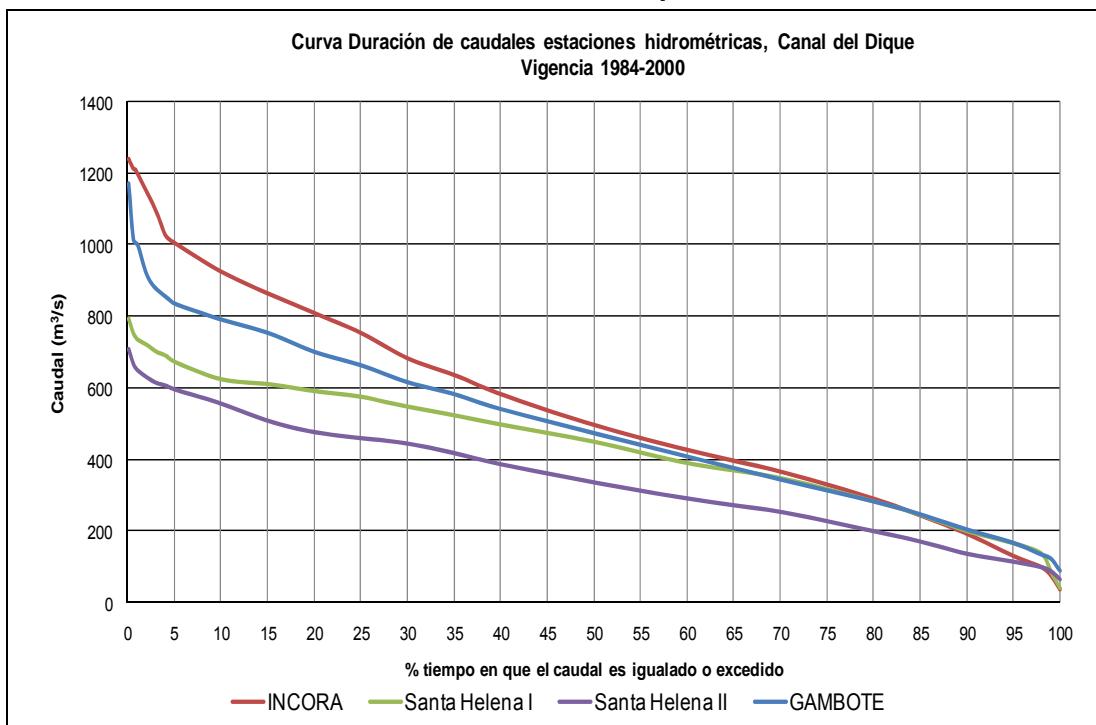


Fuente: Universidad del Norte (2003)

Tabla 2-1: Resumen características de niveles y caudales medios diarios en estaciones hidrométricas analizadas. Series completas período 1984-2000

Estación	Nivel promedio (msnm)	Caudal promedio (m ³ /s)	% del Caudal en Calamar	% del Caudal en Incora
Calamar	5.20	7,363	100.0	-
Incara	4.92	538	7.3	100.0
Gambote	2.61	490	6.7	91.0
Santa Helena I	2.52	436	5.9	80.9
Santa Helena II	1.48	346	4.7	63.3

Figura 2-2: Curvas de duración de caudales medios diarios estaciones hidrométricas en el Canal del Dique



De forma consistente con los resultados de la Fase I, el análisis de los resultados presentados en la Figura 2-2, indica la magnitud de los desbordes que ocurren entre estaciones hidrométricas vecinas. En el alto y parte del medio Canal del Dique (tramo entre estaciones Incora y Gambote), los resultados indican que la magnitud de los desbordes puede representar en promedio el 9% de los caudales en Incora. Para la parte restante del medio Canal del Dique (tramo entre estaciones Gambote y Santa Helena I) las pérdidas anuales pueden representar cerca del 20% de los caudales en Incora. Adicionalmente, el análisis de las curvas de duración de caudales medios diarios en las estaciones Santa Helena I y Santa Helena II sugiere una pérdida anual promedio de 90 m³/s, que es indicativa de los caudales derivados por el Caño Correa y de los desbordes hacia la Ciénaga La Honda. Desafortunadamente en el bajo Canal del Dique no existen registros hidrométricos que permitan caracterizar, a partir de información primaria, la magnitud de los desbordes y de los caudales que llegan a la bahía de Cartagena y los que son descargados al mar a través de los caños Lequerica y Matunilla.

Al igual que en la primera fase de los estudios, la magnitud de estos caudales ha sido estimada para el período extendido de análisis (1988-1997) a través del modelo acoplado hidrología-hidráulica (ver informe Análisis Hidráulicos). En lo que respecta a la variación intranual e interanual de los niveles y caudales medios diarios en estaciones hidrométricas, y de los desbordes entre tramos, los resultados obtenidos se discuten a continuación.

Tabla 2-2: Percentiles de las curvas de duración de caudales medios diarios para las estaciones hidrométricas en el Canal del Dique

CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES 1984-2000 CALAMAR			CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES 1984-2000 INCORA			CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES 1984-2000 GAMBOTE			CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES 1984-2000 SANTA HELENA I			CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES 1984-2000 SANTA HELENA II		
% tiempo igualado o excedido	No. Datos	Caudal	% tiempo igualado o excedido	No. Datos	Caudal	% tiempo igualado o excedido	No. Datos	Caudal	% tiempo igualado o excedido	No. Datos	Caudal	% tiempo igualado o excedido	No. Datos	Caudal
	6210	(m ³ /s)		6210	(m ³ /s)		6210	(m ³ /s)		6210	(m ³ /s)		6210	(m ³ /s)
0.01	1	15076.3	0.01	1	1241.2	0.01	1	1174.0	0.01	1	793.7	0.01	1	711.2
0.5	32	14626.8	0.5	32	1214.6	0.5	32	1019.1	0.5	32	754.2	0.5	32	670.4
0.75	47	14303.5	0.75	47	1211.3	0.75	47	1007.0	0.75	47	742.6	0.75	47	658.5
1	63	14100.5	1	63	1198.1	1	63	1001.1	1	63	735.0	1	63	650.7
2	125	13504.0	2	125	1146.4	2	125	915.4	2	125	719.9	2	125	631.3
3	187	12733.7	3	187	1093.0	3	187	877.8	3	187	701.3	3	187	616.1
4	249	12132.6	4	249	1026.2	4	249	856.9	4	249	690.4	4	249	608.5
5	311	11648.7	5	311	1005.4	5	311	836.5	5	311	672.4	5	311	597.4
10	621	10623.6	10	621	925.1	10	621	792.3	10	621	624.0	10	621	557.6
15	932	10258.8	15	932	864.7	15	932	754.7	15	932	610.7	15	932	509.7
20	1242.5	9855.7	20	1242.5	809.4	20	1242.5	701.4	20	1242.5	591.1	20	1242.5	477.8
25	1553	9396.8	25	1553	753.9	25	1553	663.8	25	1553	575.2	25	1553	461.4
30	1863	8890.9	30	1863	682.9	30	1863	616.5	30	1863	547.3	30	1863	446.0
35	2174	8459.1	35	2174	636.6	35	2174	583.0	35	2174	523.4	35	2174	419.2
40	2484.5	7885.4	40	2484.5	582.9	40	2484.5	541.0	40	2484.5	497.4	40	2484.5	388.0
50	3105	6992.1	50	3105	496.6	50	3105	474.1	50	3105	449.2	50	3105	337.7
60	3726.5	6332.7	60	3726.5	427.2	60	3726.5	408.0	60	3726.5	389.7	60	3726.5	292.0
70	4347	5745.1	70	4347	366.7	70	4347	344.0	70	4347	347.7	70	4347	254.7
80	4968.5	5004.2	80	4968.5	290.9	80	4968.5	282.6	80	4968.5	282.3	80	4968.5	200.6
85	5279	4547.1	85	5279	244.1	85	5279	246.3	85	5279	245.0	85	5279	171.8
90	5589	4031.8	90	5589	192.8	90	5589	203.8	90	5589	199.7	90	5589	137.4
95	5900	3357.4	95	5900	130.6	95	5900	166.4	95	5900	165.1	95	5900	115.2
98	6086	3092.9	98	6086	99.3	98	6086	133.5	98	6086	136.5	98	6086	100.0
99	6148	2953.2	99	6148	77.0	99	6148	122.9	99	6148	86.7	99	6148	89.2
100	6210.5	2519.1	100	6210.5	37.0	100	6210.5	88.3	100	6210.5	40.0	100	6210.5	65.7

Tabla 2-2: Percentiles de las curvas de duración de caudales medios diarios para las estaciones hidrométricas en el Canal del Dique

CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES 1984-2000 CALAMAR			CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES 1984-2000 INCORA			CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES 1984-2000 GAMBOTE			CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES 1984-2000 SANTA HELENA I			CURVA DE DURACIÓN DE CAUDALES 1984-2000 SANTA HELENA II		
	No. Datos	Caudal		No. Datos	Caudal		No. Datos	Caudal	% tiempo igualado o excedido	No. Datos	Caudal		No. Datos	Caudal
Caudal medio		7363.5	Caudal medio		538.5	Caudal medio		489.8	Caudal medio		435.8	Caudal medio		346.2
Caudal característico	Caudal característico		Caudal característico		Caudal característico		Caudal característico		Caudal característico		Caudal característico		Caudal característico	
Caudales máximos:	Q1	14100.5	Caudales máximos:	Q1	1198.1	Caudales máximos:	Q1	1001.1	Caudales máximos:	Q1	735.0	Caudales máximos:	Q1	650.7
	Q5	11648.7		Q5	1005.4		Q5	836.5		Q5	672.4		Q5	597.4
Caudal promedio:	Q50	6992.1	Caudal promedio:	Q50	496.6	Caudal promedio:	Q50	474.1	Caudal promedio:	Q50	449.2	Caudal promedio:	Q50	337.7
Caudales mínimos:	Q95	3357.4	Caudales mínimos:	Q95	130.6	Caudales mínimos:	Q95	166.4	Caudales mínimos:	Q95	165.1	Caudales mínimos:	Q95	115.2
	Q99	2953.2		Q99	77.0		Q99	122.9		Q99	86.7		Q99	89.2

La Figura 2-3 y la Figura 2-4 muestran la variación mensual de los caudales y niveles promedio, respectivamente, en las cinco estaciones hidrométricas consideradas, incluyendo para cada mes una barra de error que representa una desviación estándar por encima y por debajo del valor promedio. Claramente se observa en la Figura 2-3 y la Figura 2-4 la condición de frontera del sistema del Canal del Dique establecida por los niveles en Calamar, y el hecho de tener unos niveles y consecuentemente caudales, que empiezan a incrementarse desde mediados de marzo hasta noviembre, y una temporada de niveles bajos entre diciembre y marzo. Los valores de caudales promedio mensuales más bajos en la estación Calamar se encuentran en los meses de febrero y marzo, con un caudal promedio de cerca de $4780 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde para los mismos meses a $274 \text{ m}^3/\text{s}$ en Incora (6%), y valores máximos promedio de $10,130 \text{ m}^3/\text{s}$ (noviembre), correspondientes a $826 \text{ m}^3/\text{s}$ (8%) en Incora.

Figura 2-3: Series de caudales medios mensuales en estaciones hidrométricas en el Canal del Dique y en la estación Calamar

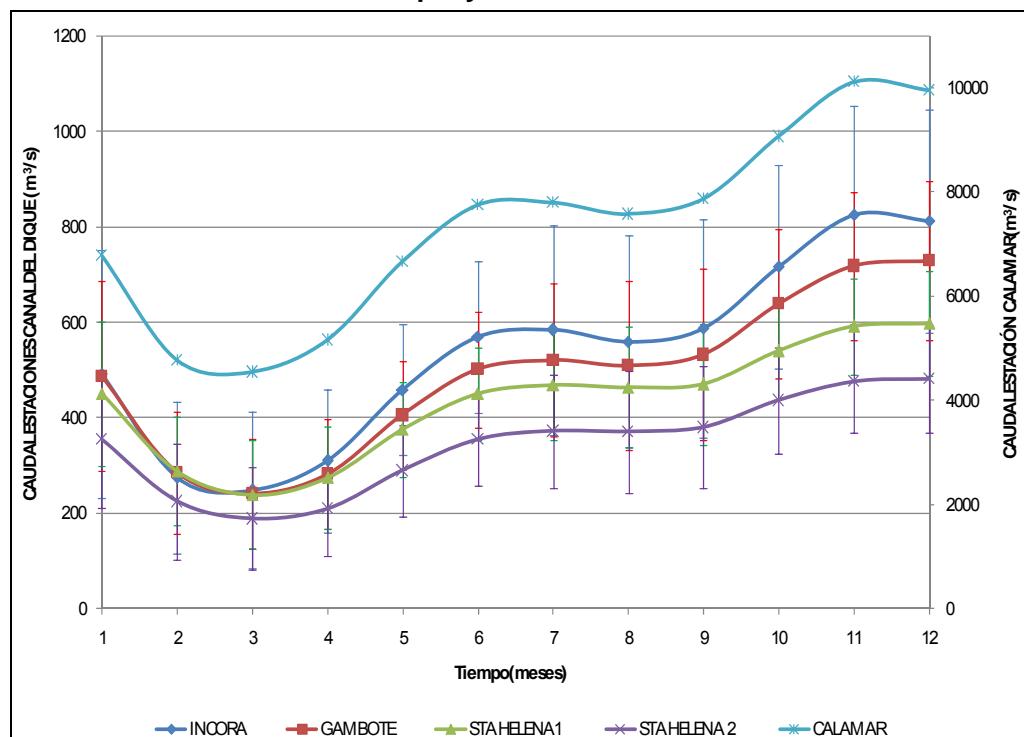
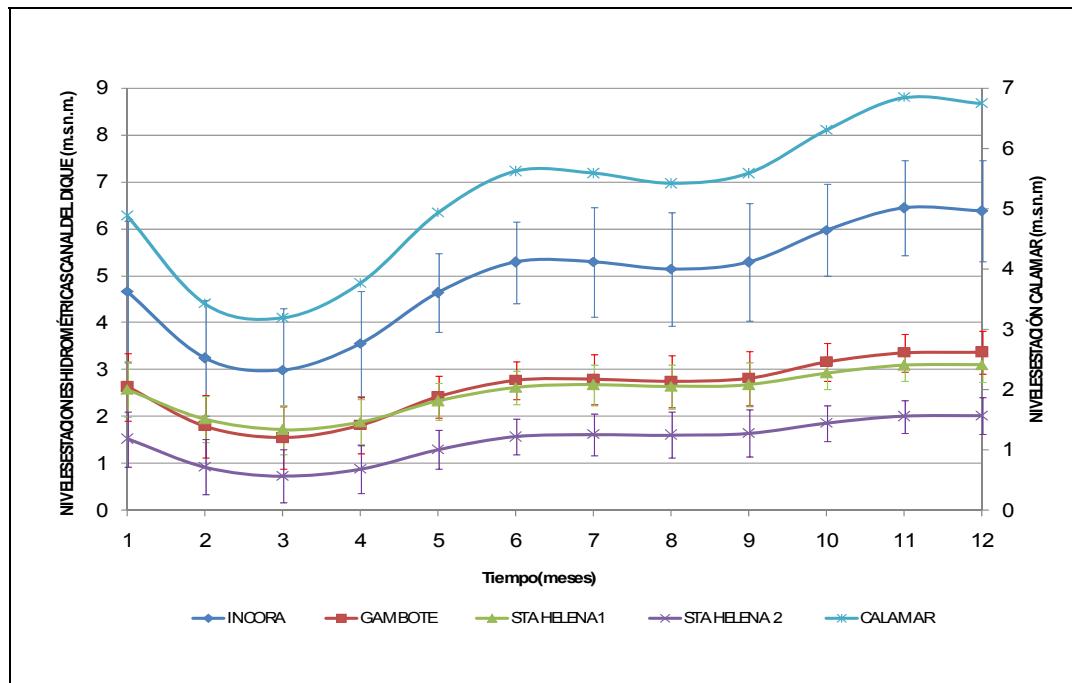


Figura 2-4. Series de niveles medios mensuales en estaciones hidrométricas en el Canal del Dique



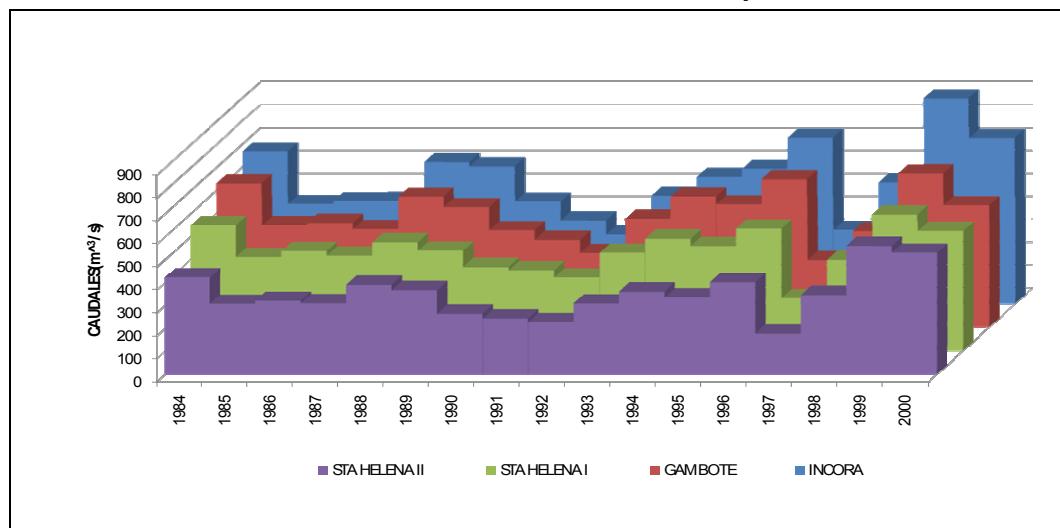
En la Figura 2-5 se presenta, para el período 1984-2000, el histograma de caudales medios anuales de las cuatro estaciones hidrométricas ubicadas en el Canal del Dique. En la Figura 2-5 es evidente la importante variabilidad interanual de los caudales en el Canal del Dique definida por la variabilidad hidrológica de los caudales del río Magdalena en Calamar, asociada en buena parte a la ocurrencia de fenómenos macroclimáticos como el ENSO. A este respecto, y analizando los resultados mostrados en la Figura 2-5 es clara, durante el período analizado, la existencia de años con caudales promedio muy por encima del promedio multianual (caso de los años 1984, 1989, 1996 y 1999), y de años con caudales significativamente por debajo del promedio multianual (caso de los años 1991, 1992 y 1997).

Estos resultados muestran la importante variabilidad interanual de los caudales en la cuenca del Canal del Dique, asociada con la ocurrencia del ENSO, consistente con los resultados de varios investigadores (Mesa *et al.*, 1997; Poveda, 2004) que muestran la importante correlación que existe entre índices del ENSO (SOI y SST3.4) y la hidrología del río Magdalena en la estación Calamar, mayor de 0.60 (Mesa *et al.*, 1997). Al ser una de las condiciones de frontera del Canal del Dique impuesta por los niveles, y consiguientemente los caudales en Calamar, se observa como durante años Niña se presentan caudales en el Canal del Dique muy por encima de los normales, mientras que durante años Niño, se tienen caudales por debajo del promedio multianual.

Esta importante variabilidad hidrológica interanual en el sistema del Canal del Dique, y la posibilidad de interacción (almacenamiento y descargas) entre el Canal y las ciénagas es lo que fundamentalmente ha motivado efectuar el análisis hidroclimatológico de un período

extendido, más largo, que el utilizado en la Fase I de los estudios, el cual, a pesar de incluir años extremadamente secos y húmedos, no refleja de forma completa la dinámica hidrológica de largo plazo del Canal del Dique y su sistema de ciénagas.

Figura 2-5: Histogramas de caudales medios anuales para las estaciones hidrométricas en el Canal del Dique

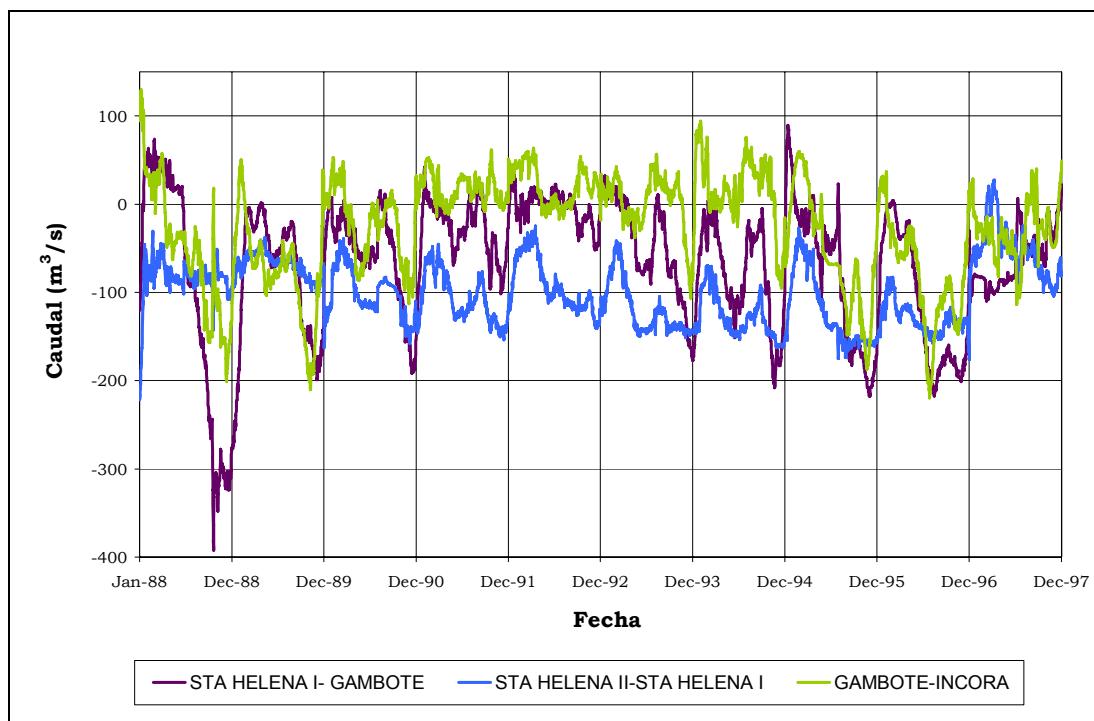


En concordancia con lo anterior, los aspectos señalados indican que no basta con analizar el régimen hidrológico e hidráulico de la cuenca del Canal del Dique para eventos particulares, condiciones promedio, o años seleccionados, sino que para comprender la dinámica del ecosistema del Canal del Dique es muy importante incluir en los análisis la variabilidad de largo plazo mostrada en la Figura 2-5 y discutida anteriormente. La importancia de este tipo de análisis resulta aún más evidente en las Figura 2-6 y Figura 2-7, en las cuales para el período 1988 - 1997, seleccionado como el período extendido de análisis, con dos años húmedos (1989, 1996) dos años secos (1990 y 1997) y el resto con condiciones hidrológicas aproximadamente promedio, se han determinado las diferencias de caudales entre estaciones hidrométricas vecinas.

Claramente se evidencia en la Figura 2-7 la dinámica supra-anual del sistema ciénagas - canal, en la cual durante el año húmedo (1996) existe un importante desborde de aguas del Canal hacia las ciénagas, volumen de agua que es almacenado en los cuerpos cenagosos del medio Canal del Dique, y posteriormente es descargado de forma paulatina y controlada a través de los caños de interconexión entre las ciénagas y el Canal durante años promedio y secos (1997). Igualmente en la Figura 2-6 se observa que las mayores diferencias de caudal entre estaciones vecinas se presentan para las estaciones en el medio Canal del Dique, sugiriendo que es en esta zona en donde se presentan las mayores interacciones ciénaga-Canal, seguidas de las que ocurren en el Alto Canal del Dique, y en menor grado en la parte baja del Canal del Dique, pues en esta zona el sistema transporta caudales menores, y está más influenciado por la condiciones de frontera impuestas por la marea, y en menor medida por el régimen de caudales en Calamar.

La anterior discusión muestra las complejidades del sistema analizado y evidencia la importancia de realizar su análisis de forma integral, considerando el acople entre el balance hídrico de las ciénagas, los correspondientes niveles en los espejos de agua, y el nivel concurrente en el Canal del Dique, caracterizando los flujos y reflujo que mantienen la dinámica natural del sistema, tal como se hizo en la Fase I de los estudios para un período corto, extendido a 10 años durante la segunda fase.

Figura 2-6: Diferencias diarias de caudales entre estaciones vecinas, período extendido de análisis 1988-1997



Como resultado final de los análisis hidrométricos efectuados se han construido las hidrógrafas de caudales medios diarios en cada una de las estaciones hidrométricas sobre el Canal del Dique (ver Figura 2-8), y que muestran nuevamente cómo hacia aguas abajo del sistema existen importantes pérdidas de caudal. Nótese igualmente lo atípico de los registros del año 1997 con caudales muy por debajo (menos del 50%) de los de otros años.

Figura 2-7: Diferencias de caudales entre estaciones Gambote e Incora para los años húmedo (1996), promedio (1993), y seco (1997). Fase II

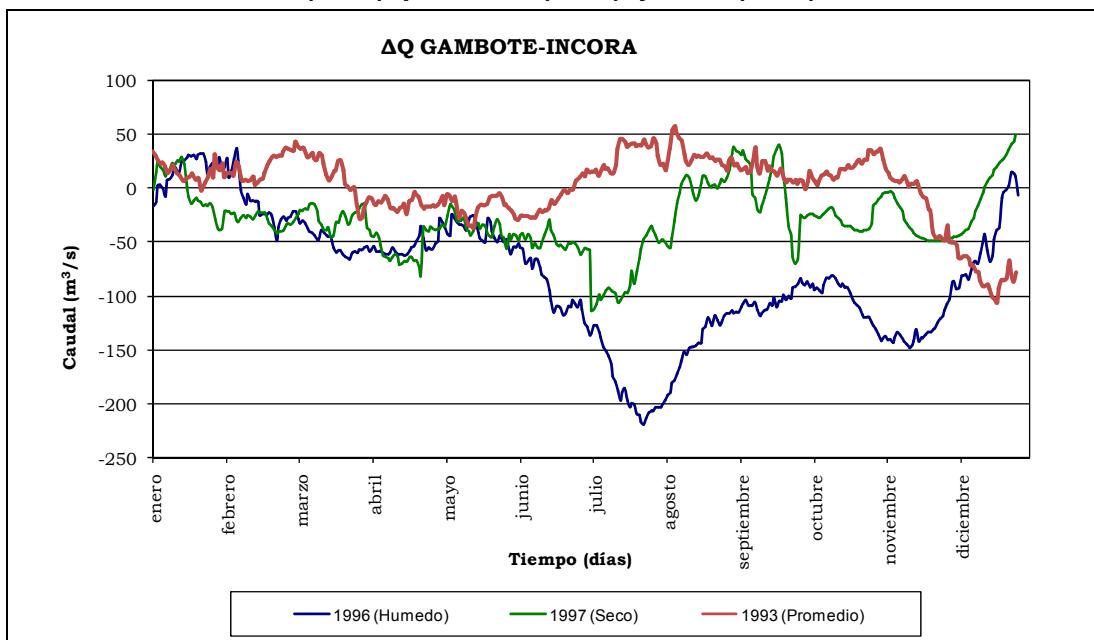
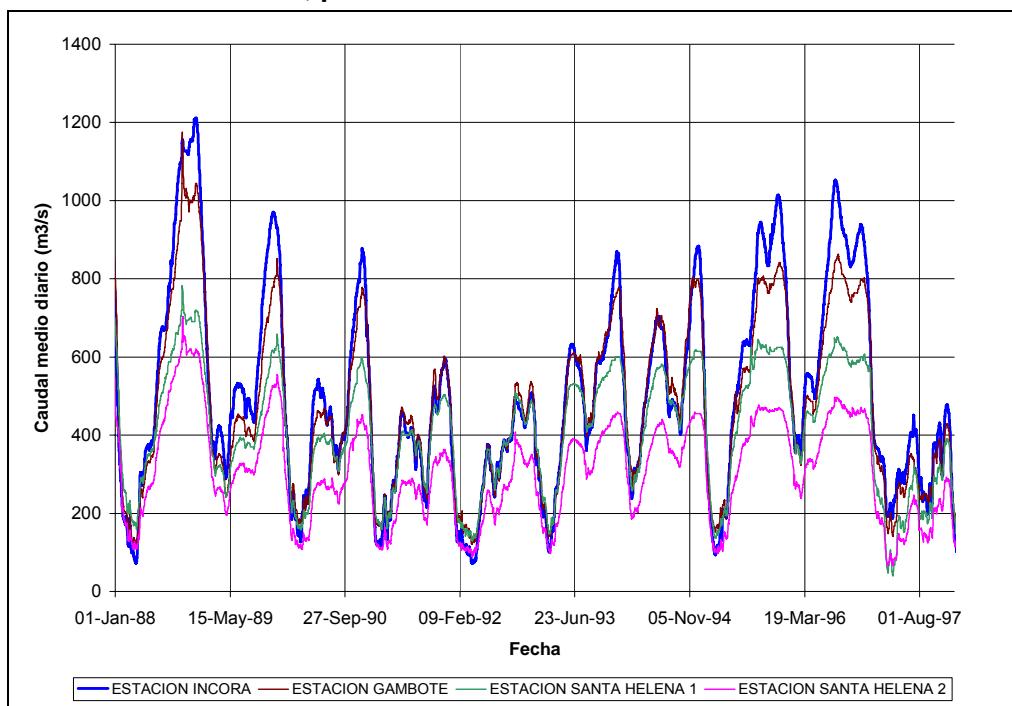


Figura 2-8: Series de caudales medios diarios en las cuatro estaciones hidrométricas analizadas, período extendido de análisis 1988-1997



2.2. MODELO ACOPLADO HIDRÁULICA –HIDROLOGÍA

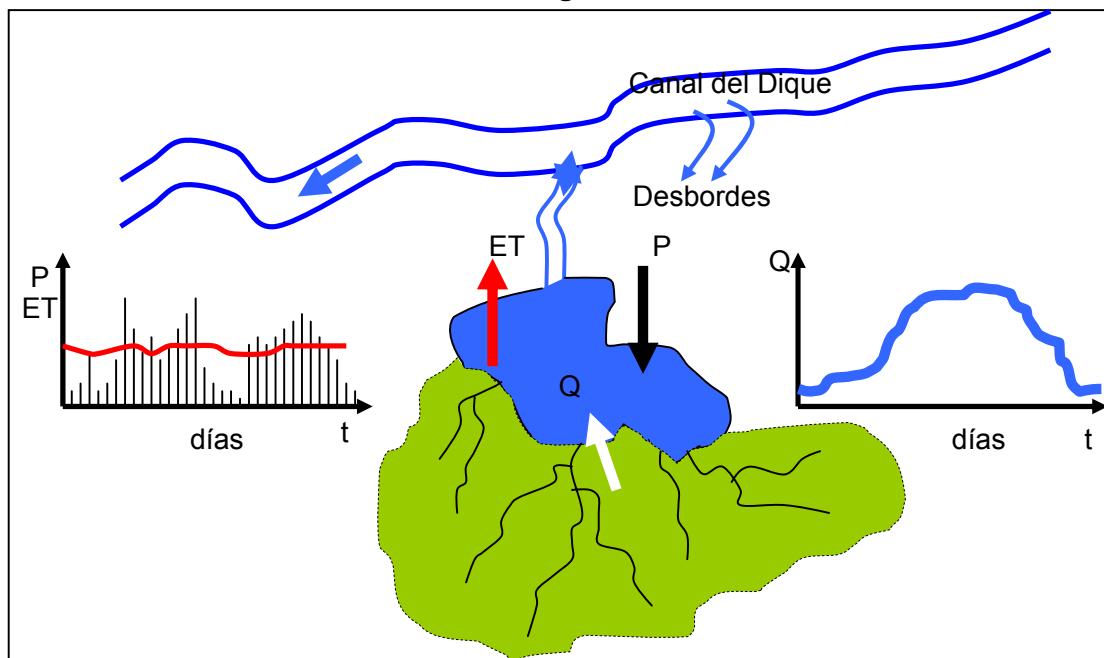
Como se resaltó en el Informe de Hidrología de la Fase I (UN-LEH, 2007), y de forma previa en este documento, la importancia de estudiar la dinámica del sistema del Canal del Dique de forma integral, a escala interanual y relacionando los aspectos hidrológicos de la cuenca con el componente hidráulico, resulta evidente y ello ha motivado la continuación de los estudios hidroclimatológicos a través de esta segunda fase.

El modelo acoplado hidráulica-hidrología ha sido descrito en detalle en el Informe de Hidráulica de la Fase I (UN-LEH, 2007). De forma resumida, el modelo acoplado requiere la definición de dos condiciones de frontera: 1) A la entrada del sistema, correspondiente a la hidrógrafo de caudales medios diarios en la estación Incora, la cual en esta segunda fase ha sido extendida al período 1988-1997, obtenida tal como se describió en el capítulo previo de este informe) Las salidas al mar de cada uno de los caños, representadas por la variación a nivel horario de la marea. Igualmente el modelo acoplado requiere condiciones intermedias en cada uno de los caños de interconexión entre el Canal del Dique y las ciénagas, representadas por la magnitud y el sentido del flujo desde las ciénagas hacia el Canal del Dique o viceversa.

Con el fin de analizar las condiciones intermedias del modelo acoplado, en la primera fase de los estudios se propuso realizar el balance hidrológico en cada cuerpo cenagoso principal, a una escala temporal lo más compatible posible con el intervalo de cálculo del modelo hidráulico (3 hr). Por esta razón, se decidió realizar el balance hidrológico a nivel diario en cada cuerpo cenagoso, metodología que ha sido seguida en esta segunda fase de los estudios, extendiendo el período de análisis al período entre 1988 y 1997.

En la estimación diaria del balance hidrológico, y para cada espejo de agua, las entradas están dadas por la precipitación, los desbordes del Canal del Dique en la zona de influencia, las entradas desde el Canal del Dique a través del caño(s) de interconexión, y los aportes de la cuenca que drena al cuerpo cenagoso. Las salidas en el balance hidrológico de cada ciénaga involucran la evaporación sobre el espejo de agua y los caudales de la ciénaga hacia el Canal del Dique (ver Figura 2-9). Las condiciones de frontera del sistema, en conjunto con las condiciones intermedias en cada cuerpo cenagoso principal, impuestas y analizadas sobre el Canal desde aguas arriba hacia aguas abajo, permiten, a través del modelo acoplado hidrología-hidráulica, implementado en subtramos del Canal principal, evaluar dichos balances y establecer la magnitud de los niveles y caudales en ciénagas y Canal para cada intervalo de cálculo del modelo hidráulico. La Figura 2-9, tomada del informe de hidrología de la Fase I, muestra un esquema de la conceptualización del balance hidrológico para cada uno de los ocho cuerpos cenagosos principales considerados, en la cual se resalta la necesidad de contar con series completas y consistentes de precipitación y evaporación para los espejos de agua, series de escorrentía de la cuenca aportante, que en conjunto con los desbordes y los flujos y reflujo en los caños de interconexión, estimados a través del modelo acoplado, permiten cuantificar el balance hídrico a nivel subdiario en cada cuerpo de agua.

Figura 2-9: Diagrama esquemático de balance hídrico a nivel diario en cada cuerpo cenagoso



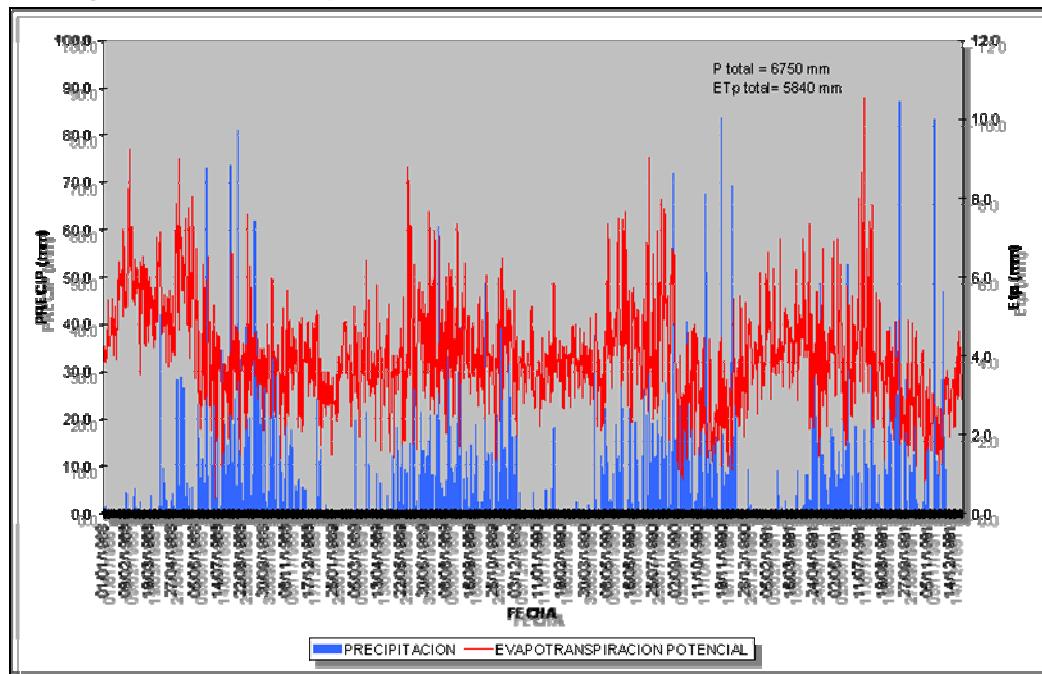
Fuente: UN-LEH, 2007

Considerando que tanto la estimación de los balances hídricos como la implementación del modelo acoplado hidrología-hidráulica en la primera fase de los estudios estuvieron limitadas a un periodo de cuatro años (1988-1991), en esta segunda fase se ha extendido el período de análisis de las series diarias de precipitación y evaporación potencial en cada espejo de agua, al período de 10 años comprendido entre 1988 y 1997. Para ello se ha seguido la metodología y recomendaciones formuladas en la Fase I de los estudios. Para cada espejo de agua, estas series han sido obtenidas a partir del procesamiento y análisis de la información primaria de precipitación y evaporación, disponible en las estaciones meteorológicas con influencia sobre el correspondiente espejo de agua. Los detalles de las estaciones consideradas, la información disponible, el procesamiento y análisis de la misma, y las espacialización de las series puntuales aplicadas a cada cuerpo cenagoso principal, se discuten en detalle en el Anexo A de este informe.

En muchos casos las series diarias de precipitación, adquiridas en el IDEAM, se encontraron bastante incompletas, por lo que fue necesario utilizar análisis estadísticos para realizar el llenado de datos faltantes utilizando ya fuesen registros de precipitación de la misma estación (a través de regresiones) o de estaciones vecinas (a través del método del inverso de la distancia). En cuanto a las series de evaporación potencial estas fueron estimadas a partir de las series diarias de tanque evaporímetro disponibles en estaciones climatológicas, afectadas por el coeficiente promedio del tanque (0.70). En casos de existencia de datos faltantes en las series de tanque evaporímetro, los valores de evaporación fueron estimados a partir de métodos combinados y de métodos basados en temperatura, propuestos en la literatura, como se describe en el Anexo A.

Las series de precipitación y evapotranspiración potencial para el período extendido de análisis 1988-1997, para el caso particular de la Ciénaga de María La Baja (utilizado, al igual que en el informe de la Fase I, como ejemplo ilustrativo de la metodología), se muestran en la Figura 2-10. Análisis similares han sido realizados para los otros siete cuerpos cenagosos principales, cuyos resultados pueden consultarse en el Anexo A. Para el caso de la Ciénaga de María La Baja los resultados, mostrados en la Figura 2-10, indican que en el largo plazo la diferencia P-ET, que es una medida de los caudales promedio anuales de escorrentía directa aportados al cuerpo cenagoso por la cuenca aferente, son del orden del 13%. Debe tenerse en cuenta que dentro de la cuenca del Canal del Dique, las mayores precipitaciones ocurren sobre las subcuenca de la ciénaga de María La Baja. Para el caso de los otros cuerpos cenagosos, las diferencias P-ET son aún más reducidas, sugiriendo subcuenca cercanas al déficit, cuya respuesta hidrológica, en términos de caudales de escorrentía directa, solo se da para eventos importantes de precipitación. Este resultado es congruente con la caracterización hidroclimatológica de la zona de estudio (UN-LEH, 2007).

Figura 2-10: Series diarias de precipitación y evaporación para el espejo de agua de la Ciénaga de María La Baja, durante el período de análisis extendido 1988-1997



En relación con los aportes de la cuenca aferente a cada cuerpo cenagoso, al igual que en la Fase I de los estudios, estos han sido obtenidos a través de la modelación matemática hidrológica a nivel diario y de tipo continuo, efectuada para el período de análisis extendido 1988-1997. Para ello, se ha realizado la modelación utilizando la estructura de un tanque del modelo HEC-HMS (U.S. Army Corps of Engineers, 2005), siguiendo la metodología y el proceso de calibración descritos en detalle en el informe de hidrología de la Fase I. A continuación brevemente se presentan las características generales de la modelación hidrológica efectuada, y los resultados obtenidos durante el período 1988-1997 para cada uno de los ocho cuerpos cenagosos principales.

2.3. MODELACIÓN DE LAS CUENCAS APORTANTES A LAS CIÉNAGAS

Con el fin de determinar el aporte de escorrentía, a nivel diario, de las cuencas aferentes a cada uno de los principales cuerpos cenagosos, y utilizando la información climatológica obtenida tal como se describió en el numeral anterior, se han implementado para el período 1988-1997 modelos HEC-HMS a nivel diario y continuo para los principales cuerpos cenagosos, utilizando la topología, métodos y procedimientos de calibración descritos en detalle en el informe hidroclimatológico de la Fase I de los estudios (UN-LEH, 2007). Debería esperarse que al extender el período de análisis, datos de cuencas instrumentadas, con registros diarios y simultáneos de caudal y precipitación, deberían estar disponibles para efectos de recalibración de los modelos desarrollados en la primera fase de los estudios. Desafortunadamente y después de una intensa búsqueda de este tipo de cuencas instrumentadas en la zona de estudio, el banco de datos del IDEAM mostró la inexistencia de cuencas con este tipo de información, con lo cual los modelos calibrados en la Fase I de los estudios no pudieron ser recalibrados y fueron directamente aplicados para simular caudales durante el período extendido de análisis, a partir de registros de precipitación y evapotranspiración del período 1988-1997.

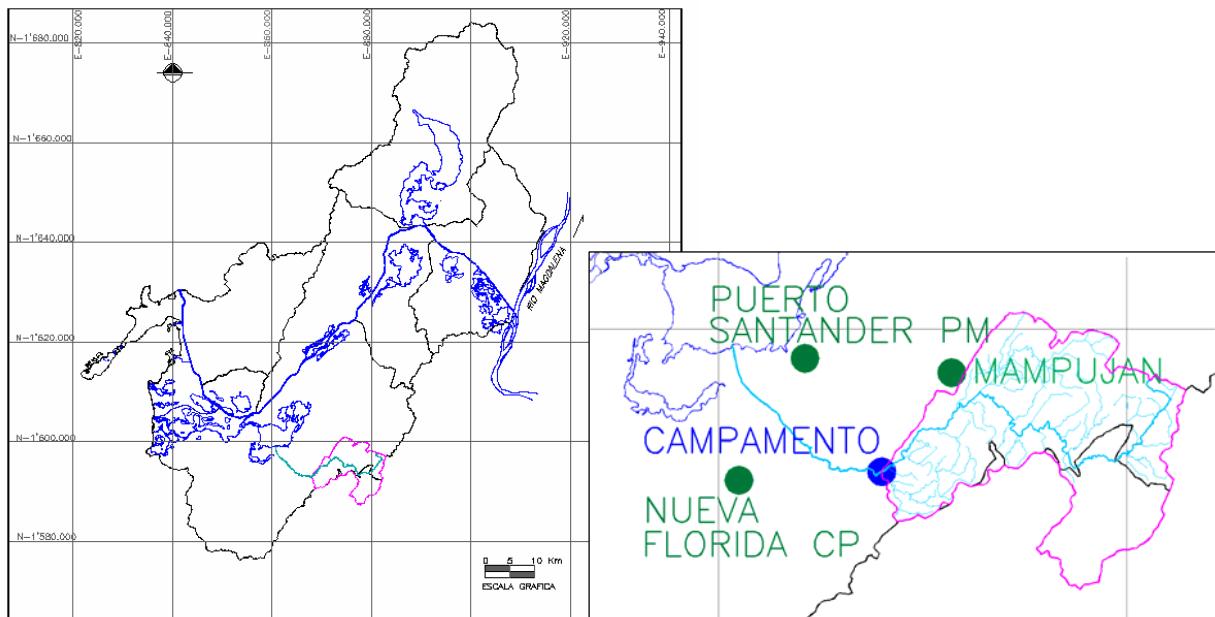
Tal como se describe en detalle en el informe hidrológico de la Fase I, la modelación continua con HEC-HMS tiene en cuenta el efecto de la evapotranspiración y realiza un continuo seguimiento de la evolución de la humedad en el suelo. Durante la Fase I de los estudios se seleccionaron como métodos hidrológicos de análisis el método del hidrograma unitario del Servicio de Conservación de Suelos para la transformación de precipitación efectiva en escorrentía y el método de Muskingum para el tránsito de crecientes. La evapotranspiración potencial en la Fase I fue estimada directamente dentro del modelo HEC-HMS, a partir de series de radiación y temperatura diaria, y a través del método combinado de estimación de evapotranspiración propuesto por Priestley-Taylor (1972). Estos mismos métodos hidrológicos fueron utilizados en la segunda fase de los estudios. Adicionalmente, se investigó en HEC-HMS la estimación de la evapotranspiración potencial diaria a partir de medidas puntuales mensuales de tanque, obteniéndose resultados consistentes con los de los métodos de estimación señalados.

Con relación al seguimiento de la evolución de la humedad del suelo, de acuerdo con los resultados de la Fase I de los estudios, y siguiendo criterios de parsimonia y simplicidad, se adoptó por implementar en la segunda fase de los estudios el modelo hidrológico continuo más simple, el cual consta de un único tanque (en contraposición con el modelo de cinco tanques disponible también en HEC-HMS e investigado en detalle en la primera Fase de los estudios) el cual es llenado a través de la infiltración y vaciado por efecto de la evapotranspiración y percolación. Este esquema de modelación requiere el establecimiento de las condiciones iniciales en el tanque y la calibración de dos parámetros (el nivel máximo de almacenamiento y la tasa constante de pérdidas).

La calibración de los parámetros antes descritos y del parámetro de flujo base, realizada durante la Fase I de los estudios, se utilizó la información simultánea disponible para el año 1989 de precipitación diaria (estaciones Mampujá, Puerto Santander y Nueva Florida) y caudal diario (estación Campamento) de la cuenca del Arroyo Corral (ver Figura 2-11), subcuenca de la Ciénaga de María La Baja, con un área de 103 km².

Durante la segunda fase de los estudios se consideró muy importante realizar la recalibración y posible validación de los modelos implementados en las cuencas aportantes a cada espejo de agua, considerando un período mayor al utilizado durante la primera fase de los estudios (un año). Sin embargo, y tal como se mencionó anteriormente, las limitaciones en la información disponible en el IDEAM en las posibles subcuenca escenario de recalibración y validación para el período extendido, impidieron realizar esta actividad.

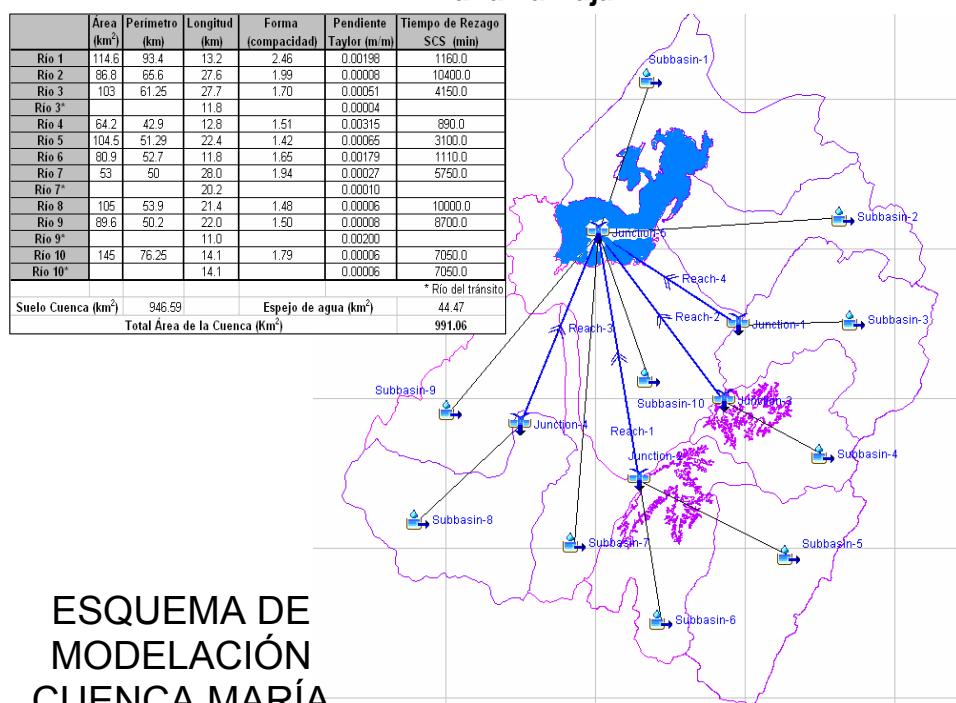
Figura 2-11: Localización de la cuenca del Arroyo Corral en la cuenca del Canal del Dique y ubicación de las estaciones meteorológicas y de caudal utilizadas en el proceso de calibración del modelo lluvia-escorrentía



Fuente: UN-LEH, 2007

Como ejemplo ilustrativo de la modelación extendida efectuada, se presenta la modelación de la cuenca de la Ciénaga de María La Baja, con un área de 945 km², la cual se ha dividido en 10 subcuenca con áreas de aproximadamente 100 km² cada una. Para cada una de estas subcuenca en la Fase I se calcularon las características morfométricas y se realizó la conceptualización del esquema de modelación de la cuenca en HEC-HMS, tal como se presenta en la Figura 2-12. Los resultados de la modelación y en particular la hidrógrafa de caudales de entrada a la Ciénaga de María La Baja durante el período de simulación extendido 1988-1997 se muestra en la Figura 2-12. Idéntico procedimiento ha sido seguido para las otras siete ciénagas, y los resultados pueden ser consultados en el Anexo A de este informe.

Figura 2-12: Esquema de modelación en HEC-HMS para la cuenca de la Ciénaga de María La Baja



ESQUEMA DE MODELACIÓN CUENCA MARÍA LA BAJA

Las características morfométricas de cada subcuenca se muestran en la Tabla

Fuente: UN-LEH, 2007

Los resultados de la Figura 2-13 indican que la escorrentía que llega al espejo de agua de la Ciénaga de María La Baja, desde su cuenca aportante, durante el período de simulación extendido (1988-1997), es de 2173 mm aproximadamente, que representa el 13.3% de la precipitación total sobre la cuenca (16,320 mm), porcentaje muy similar al obtenido para el período de simulación (1988-1991) de la Fase I e igual al 13.5 %. Debe resaltarse la ocurrencia de picos de caudal para precipitaciones diarias importantes, por lo general mayores de 50 mm. Los resultados para otras cuencas se sintetizan en la Tabla 2-3 y se muestran gráficamente en el Anexo. A

Figura 2-13: Resultados de la modelación continua con HEC-HMS para la cuenca de la Ciénaga de María La Baja, utilizando el modelo simplificado de un solo tanque para el período de simulación 1988-1997

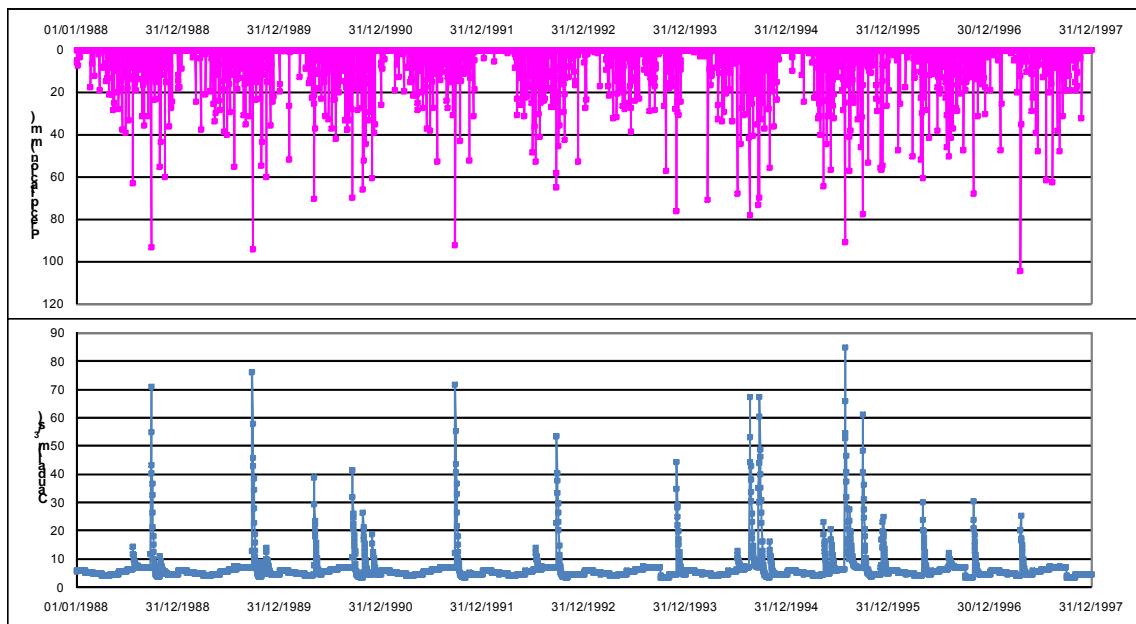


Tabla 2-3: Resultados modelación hidrológica de cuencas aferentes a cada cuerpo cenagoso para el período extendido de simulación 1988-1997

Ciénaga	Precip (mm)	Pérdidas (mm)	Escorrentía (mm)	Escorrentía como % de P (%) Fase II	Escorrentía como % de P (%) Fase I	Precipitación Neta como % de P Uninorte (2003)
Jobo	9761	7938	1823	18.7	20.5	5.4
Guájaro	9616	7807	1809	18.8	20.2	10.6
Capote	12235	10455	1780	14.6	17.4	4.8
Luisa	8558	6502	2056	24.0	26.7	4.0
Aguas Claras	12743	10782	1960	15.4	14.2	4.0
Matuya	15630	13758	1872	12.0	11.5	8.8
María la Baja	16321	14147	2174	13.3	13.5	8.8
Juan Gómez	13547	11675	1872	13.8	14.3	7.5

Los resultados mostrados en la tabla indican que para el período de análisis extendido (1988-1997), la escorrentía, en términos generales, disminuye ligeramente desde aguas arriba hacia aguas abajo en el sentido del flujo en el Canal del Dique. Resultados similares fueron obtenidos en la Fase I de los estudios. La lámina de escorrentía obtenida representa entre el 12% y el 20% de la precipitación sobre las cuencas investigadas. La cuenca aportante a la Ciénaga La Luisa es una excepción pues genera escorrentías superiores al 24% de la precipitación. Este hecho es debido a las características particulares de la serie de precipitación aplicada sobre esta cuenca, la cual, a pesar de tener relativamente bajos valores de precipitación total (8,558 mm), en comparación con los de la cuenca total del Canal del Dique, presenta mayores intensidades de precipitación que en las otras cuencas, generando mayores valores de escorrentía.

Realizando un cálculo aproximado de la escorrentía que se generaría sobre toda la cuenca del Canal del Dique (nótese que aquí se han modelado únicamente los ocho cuerpos cenagosos mayores), utilizando los porcentajes arriba descritos, para una precipitación promedio sobre toda la cuenca de 1290 mm (UN-LEH, 2007) se tendría una lámina entre 140 y 260 mm, que representaría un aporte de caudal promedio entre 20 y 35 m³/s, aproximadamente entre el 5% y el 7% de los caudales promedio derivados por el Canal del Dique. A primera vista el orden de magnitud de estos aportes podría parecer despreciable, sin embargo, son estos aportes los que contribuyen a mantener la dinámica del sistema ciénagas – Canal del Dique y por este motivo se considera indispensable incluirlos en el modelo acoplado hidráulica-hidrología.

Las tres últimas columnas de la Tabla 2-3 muestran la comparación entre los resultados de la modelación hidrológica realizada para cada cuenca aportante a cada ciénaga en la Fases I y II de los estudios, y su comparación con respecto a los resultados del balance hídrico mensual de las mismas cuencas, desarrollado por la Universidad del Norte (2003). Sistemáticamente para todas las cuencas los valores reportados por la Universidad del Norte son inferiores a los obtenidos en ambas fases. La razón para ello radica en que los valores de la Universidad del Norte solo incluyen la precipitación neta, y no consideran los aportes de aguas subterráneas, los cuales sí son tenidos en cuenta en la modelación hidrológica diaria desarrollada en este estudio para cada cuerpo cenagoso.

Considerando que el balance hídrico de cada cuerpo cenagoso requiere la solución simultánea de las condiciones de frontera, representadas por el nivel en el espejo de agua y en el Canal del Dique, y la inclusión de las entradas y salidas a cada ciénaga, su cálculo se realiza a través del modelo acoplado hidráulica –hidrología. Por tanto, la discusión de los resultados del cálculo del balance hídrico, durante el período de simulación extendido, para cada cuerpo cenagoso se realiza en detalle en el Capítulo 3.

3. MODELACIÓN HIDRÁULICA

Con el fin de apoyar la evaluación de la factibilidad técnica de disminución del caudal en el Canal del Dique y su Sistema Lagunar se modelaron matemáticamente diferentes alternativas. Este informe contiene la metodología seguida y los resultados obtenidos de modelación matemática de dichas alternativas en los componentes de hidráulica, de calidad del agua y limnología de las ciénagas.

Se realizaron varias inspecciones de campo, y una campaña topo batimétrica para recolectar información relevante y necesaria para el modelo matemático y la simulación de escenarios. Se realizó una amplia modelación preliminar para precisar el efecto y la mejor localización de los sitios de reducción de la sección transversal del Canal del Dique y del efecto de una compuerta-esclusa de Paricuica aguas abajo en el sector de el Recreo. Se consideraron alternativas de reducción generalizada del caudal en el sistema mediante el angostamiento de la sección transversal en diferentes sectores del Canal estratégicamente seleccionados; alternativas de reducción del caudal y sedimentos hacia la Bahía de Cartagena mediante compuerta-esclusa en el sector de Paricuica localizada ésta, bien en el kilómetro 104, o en el kilómetro 110 del Canal; y alternativas que combinan, tanto la construcción de los angostamientos de la sección transversal del Canal, como la construcción de la compuerta - esclusa.

La modelación de seis alternativas estudiadas se realizó mediante el modelo matemático integrado hidráulico, de calidad del agua y ecológico del Canal del Dique y su Sistema Lagunar implementado en el proyecto CORMAGDALENA-UNAL (2007a, 2007b; Camacho et al., 2008) en la plataforma SIMULINK de MATLAB (The MATHWORKS Inc, 1996) con algunas modificaciones y actualizaciones incorporadas en el presente trabajo. La modelación se realizó también con el apoyo del modelo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center- U.S. Army Corps of Engineers), implementado por la Universidad del Norte (IDEHA, 1999, 2002, 2003a, 2003b), para las condiciones de caudales bajos sin desborde lateral.

3.1. CONSIDERACIONES PARA LA MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA REDUCCIÓN DEL CAUDAL EN EL CANAL DEL DIQUE

En este capítulo se presentan los elementos conceptuales que han orientado la actualización y aplicación del modelo matemático hidráulico, de calidad del agua y limnológico en el presente estudio. Se definen los objetivos de la modelación matemática de la reducción del caudal en el Canal, y se resume la metodología seguida.

3.1.1. Objetivos de la modelación matemática de reducción del caudal

La modelación matemática en este trabajo pretendió apoyar la evaluación y selección de alternativas de manejo hidrosedimentológico del Canal del Dique y su sistema lagunar en los términos propuestos en el proyecto previo CORMAGDALENA-UNAL (2007). El objetivo

general sigue siendo responder mediante un modelo matemático hidráulico y de calidad del agua, apropiadamente calibrado con datos de campo, preguntas sobre el comportamiento más probable del Canal del Dique y su sistema lagunar bajo diferentes alternativas de intervención, y apoyar el diseño del plan de manejo hidrosedimentológico del sistema, en los términos señalados en la Resolución 249 del MAVDT.

El objetivo de realizar la modelación matemática del Canal del Dique y su sistema lagunar para diferentes alternativas de reducción de caudal es también el de suministrar los datos necesarios de entrada para la modelación de la zona costera de la bahía de Barbacoas con el fin de cuantificar los potenciales efectos dañinos a corales sobre el PNN Islas del Rosario y San Bernardo, aspecto que siempre se ha señalado como fundamental en la toma de decisiones integrales.

Específicamente, con el modelo matemático en este proyecto se calculan:

- Caudales y niveles de agua en el Canal del Dique, los caños Correa, Matunilla y Lequerica, y los caños de interconexión con las ciénagas, y niveles de agua en las ciénagas, bajo diferentes condiciones hidrológicas e hidrogramas de entrada en Calamar, y considerando diferentes alternativas de reducción del caudal en el sistema mediante angostamientos parciales de la sección transversal en algunos sectores a lo largo del mismo y una compuerta-esclusa en el sector de Paricuica.
- Sedimentos en suspensión y sedimentación en el Canal del Dique, los caños, las ciénagas y la carga sólida aportada a las bahías de Cartagena y Barbacoas, bajo diferentes condiciones hidrológicas, hidrogramas y carga sólida a la entrada por Calamar, y considerando las alternativas de reducción en el caudal en el sistema.
- Calidad bacteriológica, biológica y físico-química del agua del Canal del Dique, los caños y las ciénagas, bajo diferentes condiciones hidrológicas y carga contaminante a la entrada por Calamar y considerando las alternativas de reducción en el caudal en el sistema.

A partir del caudal y el nivel del agua se pueden identificar problemas de disponibilidad del agua para riego y para consumo humano con la actual infraestructura física de captación y distribución (requerimientos 1 y 4, Resolución 249 de 2004 MAVDT). A partir de los cálculos de caudales en las interconexiones ciénaga-canal y ciénaga-caños es posible estimar el caudal ecológico que requieren los cuerpos de agua y la profundidad de agua en las ciénagas (requerimientos 2 y 10 Res. 249 de 2004 MAVDT).

El cálculo de sedimentos en suspensión en todo el sistema hídrico es un componente importante de la modelación hidrosedimentológica (requerimiento 9, Res. 249). Los aportes de carga de sedimentos al mar calculados permiten en la componente de modelación de la zona marina de la Bahía de Barbacoas, cuantificar el potencial del daño a corales sobre el PNN Islas del Rosario y San Bernardo (requerimiento 13, Res. 249).

El cálculo de la calidad bacteriológica, biológica y físico-química del agua en todo el sistema permite evaluar los efectos ambientales en cuerpos de agua en términos de los conflictos

uso-calidad del agua que se generan, los impactos en el estado limnológico de los cuerpos de agua dulce (requerimiento 11, Res. 249 de 2004), y la dinámica de la cuña salina en los cuerpos de agua. Los cálculos de calidad del agua, conjuntamente con los cálculos de caudales en las interconexiones ciénaga-canal y ciénaga-caños permiten estimar el caudal ecológico que requieren los cuerpos de agua (requerimiento 2, Res. 249 de 2004 MAVDT).

3.1.2. Complejidad del sistema modelado y antecedentes de modelación

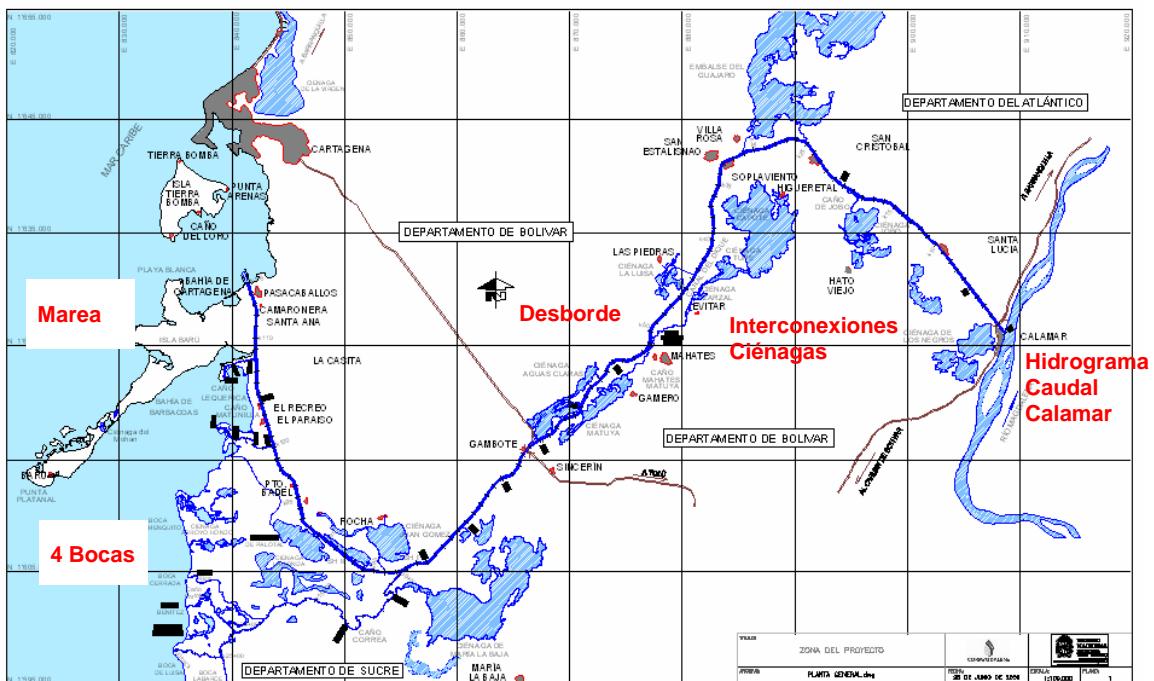
El sistema hídrico conformado por el Río Magdalena, el Canal del Dique, los caños, ciénagas y bahías es muy extenso y complejo. Todos los cuerpos de agua interactúan entre sí, algunos de manera libre, y otros de forma controlada mediante compuertas. Esta complejidad ha sido bien descrita en los informes del proyecto CORMAGDALENA-UNAL (2007a, 2007b). Para la modelación de este sistema se implementó una herramienta matemática flexible (CORMAGDALENA-UNAL 2007a, 2007b; Camacho *et al.*, 2008) en la plataforma SIMULINK de MATLAB (The MATHWORKS Inc, 1996). La descripción de la herramienta no se repite aquí y el lector interesado se remite a los Capítulos 1 a 3 del informe CM-CD-07 del proyecto mencionado (CORMAGDALENA-UNAL, 2007b) y a las publicaciones Camacho *et al.*, (2008) y Ordoñez *et al.*, (2008a, 2008b).

En el presente trabajo se ha aplicado el modelo matemático mencionado, el cual cumple con los siguientes requerimientos considerados necesarios en cualquier ejercicio de modelación del Canal del Dique y su sistema lagunar (ver Figura 3-1):

- Representar y calcular correctamente los niveles y caudales de salida y entrada de las ciénagas desde y hacia el Canal del Dique por desborde, y a través de los canales de interconexión.
- Integrar cantidad y calidad del agua en el Canal del Dique y las ciénagas en un solo modelo matemático para resolver preguntas relacionadas con los flujos de agua, sedimentos, materia orgánica y nutrientes por desborde del Canal del Dique y/o a través de los canales de interconexión con el fin de evaluar impactos de contaminación patógena, sedimentación, potencial de salinización, potencial de eutrofificación, y alteración de cadena trófica y alimenticia de nutrientes – fitoplancton - zooplancton en los cuerpos de agua.
- Modelar correctamente el efecto de la marea en los Caños y el Canal del Dique con el fin de calcular en forma automática los caudales derivados por cada brazo en la parte baja. Este requerimiento implica que el modelo es dinámico en cantidad y calidad de agua (*condiciones de flujo y calidad del agua no permanente*).

Permitir la simulación de eventos dinámicos cortos desde la apertura de una compuerta que afecta la distribución de agua y sedimentos en el sistema, hasta series de tiempo de largo plazo, que permitan modelar y representar adecuadamente el balance hídrico del sistema lagunar. Este último requerimiento implica que deben integrarse al modelo hidráulico del sistema los resultados de un modelo hidrológico de cada ciénaga aportando los datos de precipitación, evaporación y escorrentía directa a nivel diario en un periodo multianual.

Figura 3-1: Sistema complejo modelado del Canal del Dique



Desafortunadamente estos requisitos no se cumplen, ni siquiera el primero, cuando se utiliza el modelo hidráulico HEC-RAS para condiciones de caudales altos que generan desborde, implementado por la Universidad del Norte (IDEHA, 1999, 2002, 2003a, 2003b). La utilización de esta última herramienta desvirtúa por lo tanto la reciente modelación efectuada por Boada y Sáenz (2007), y las conclusiones que se derivan del ejercicio realizado para cuantificar la disminución de caudales en el Canal del Dique y su sistema lagunar mediante un campo generalizado de espigones con el que se buscaba reducir la sección transversal del Canal a todo lo largo de su recorrido.

3.1.3. Metodología

Con el fin de apoyar el análisis de factibilidad de reducción de la carga sedimentológica que llega a la Bahía de Cartagena por reducción del caudal en el Canal del Dique mediante angostamiento de la sección del Canal por sectores y la construcción de la compuerta-esclusa de Paricuica en el sector del Recreo se siguió la siguiente metodología:

- Realización de inspecciones de campo y una campaña de mediciones topo batimétrica con el fin de corroborar los sitios de desborde y actualizar las secciones transversales actuales del Canal en varios sectores, de los caños de intercambio canal-ciénaga, y de los rompederos o sitios de desborde actuales. Esto con el fin de reducir la incertidumbre y mejorar la precisión de los resultados del modelo en los caudales y volúmenes de agua de intercambio con las ciénagas.

- Actualización del modelo integrado hidráulico, de calidad del agua y limnológico del Canal del Dique CORMAGDALENA-UNAL (2007b) con los datos recopilados, y recalibración hidráulica del modelo.
- Implementación y análisis matemático preliminar amplio mediante la utilización del modelo HEC-RAS en condiciones de caudal bajo, sin desborde lateral, para precisar el efecto y la mejor localización de los sitios de reducción de la sección transversal del Canal del Dique; del efecto de la compuerta-esclusa aguas abajo en el sector de Paricuica; y de la geometría básica factible y efectiva de las obras de angostamiento y cotas de la compuerta-esclusa.
- Definición conceptual de alternativas de disminución de caudal y sedimentos a ser evaluadas en forma completa en los aspectos de comportamiento hidráulico, de calidad del agua y limnológico del Canal del Dique y el sistema lagunar.
- Definición geométrica de las obras de angostamiento, cotas de las compuertas-esclusas consideradas y localización e implementación de las alternativas en el modelo integrado (CORMAGDALENA-UNAL, 2007b) actualizado.
- Simulación matemática de alternativas y análisis de resultados de comportamiento y efecto de disminución del caudal en el Canal del Dique y el sistema lagunar.
- Generación de hidrogramas de caudal y curvas de concentración de todos los determinantes de calidad del agua modelados (sólidos suspendidos totales SST, temperatura, oxígeno disuelto, etc) en las Bocas de los Caños Correa, Matunilla y Lequerica de las diferentes alternativas que constituyen los datos de entrada requeridos para la modelación de la zona marina de la Bahía de Barbacoas (ver Capítulo 0).

3.2. ACTUALIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DEL CANAL DEL DIQUE

Los días 16 a 18 de octubre de 2008 se realizaron inspecciones de campo en toda la zona del Canal del Dique, bajo condiciones de aguas altas, con el fin de corroborar los sitios de desborde y revisar la planeación de una campaña de mediciones para actualizar las secciones transversales de los caños de intercambio canal-ciénaga y los rompederos actuales. El abscisado del tramo de estudio inicia en el Río Magdalena en Calamar (Km 0.0) y la localización de los puntos se hizo mediante GPS. Adicionalmente se identificaron las posibles zonas para realizar desbordes controlados entre el Canal del Dique y las siguientes ciénagas:

- Ciénaga de Capote entre el Km 35 y el Km 39
- Ciénaga Matuya y el Canal del Dique entre el Km.57 y el Km. 60.
- Ciénaga de Aguas Claras entre el Km. 60 y el Km. 62.

También se identificaron las zonas donde se han realizado obras que han modificado las secciones transversales y como consecuencia los niveles de desborde en esos sitios. Se determinó que las cotas del carreteable desde Calamar hasta la población de Santa Lucía debían ser actualizadas, ya que la información de niveles de desborde del modelo en ese tramo no concordaban con el dique construido. Esta era una zona de especial interés porque se propuso una contracción de la sección del Canal del Dique, y era necesario evaluar si el efecto de aumento de nivel del agua por efecto de la contracción podría generar desbordes hacia la margen derecha al Distrito de Riego y a la población de Santa Lucía.

Otra zona estratégica del Canal que se inspeccionó con detalle fue el triángulo de la bifurcación del Caño Correa, para estimar en primera medida el impacto que se generaría por el aumento del nivel del agua debido al remanso que produce la construcción de la compuerta en el Km 104. Adicionalmente se verificaron los sitios de desborde e impactos potenciales que se podían generar por el aumento del caudal en la bifurcación por el Caño.

Adicionalmente se realizó una inspección del sitio propuesto para la construcción de la compuerta en el Km 104 del Canal, analizándose las condiciones del terreno para la cimentación y los niveles desborde en ambas márgenes del Canal desde ese punto hasta el Km 82 (caño Correa).

En las Fotografía 3-1 se presentan algunos de los sitios importantes identificados en esta inspección.

Fotografía 3-1: Caños de interconexión y rompederos (sitios de desborde) hacia las ciénagas



Caño interconexión ciénaga Jobo



Rompedero hacia la ciénaga La Luisa

Fotografía 3-1: Caños de interconexión y rompederos (sitios de desborde) hacia las ciénagas



Rompedero hacia la ciénaga de Tupe



Caño interconexión ciénaga Aguas Claras



Rompedero hacia la ciénaga de Matuya



Rompedero ciénaga de Palotal

3.2.1. Nuevas secciones transversales y discretización hidráulica

Los días 01 a 05 de noviembre de 2008 se realizaron levantamientos hidrotopográficos utilizando ecosonda para tomar datos de las secciones longitudinales entre el Canal del Dique, los Caños y las Ciénagas en todas las conexiones ciénaga-canal. Se realizó el levantamiento del caño Jobo, del caño Mahates, del caño de interconexión con la ciénaga de Aguas Claras y del caño de interconexión que actualmente se encuentra cerrado entre el canal y la ciénaga de Palotal. Se levantaron tres secciones transversales entre el K1 y el K10 para identificar los niveles de desborde del carreteable de la margen derecha y Santa Lucía. Adicionalmente se levantaron las secciones longitudinales donde se identificaron rompederos o zonas de desborde entre el canal y las ciénagas de Capote, Matuya, La Luisa y Tupe.

Para la zona correspondiente al triángulo en inmediaciones de la bifurcación del caño Correa se levantaron 6 secciones transversales distribuidas de la siguiente manera: 2 secciones sobre el canal antes del caño Correa, 2 secciones sobre el canal después del caño Correa y 2 secciones sobre el caño Correa.

Los perfiles de las secciones transversales levantadas en los diferentes sitios y las tablas con los datos detallados se presentan en el Anexo A del presente informe. Estas secciones transversales se utilizaron en la actualización de los modelos del canal del dique, el modelo hidráulico HEC-RAS, y el modelo integrado del sistema implementado en SIMULINK.

Para la modelación matemática del Canal del Dique se utilizaron las demás secciones transversales levantadas por el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de Las Flores, con separación de 1 km, correspondientes al año 1999, desde el K0+000 (Calamar) hasta el K115 (Pasacaballos). Para los caños Correa, Matunilla y Lequerica se utilizaron las secciones transversales levantadas por la Universidad de Cartagena, correspondientes al año 2002, con separación de 1 km en el Caño Correa y de 500 m en los otros caños. Estas secciones transversales son las mismas consideradas en la modelación matemática del Canal del Dique en el estudio CORMAGDALENA-UNAL (2007b).

En el presente estudio se utilizó una discretización del sistema del Canal del Dique más detallada aumentando los tramos de análisis empleados en el estudio CORMAGDALENA-UNAL (2007b). El Canal fue dividido en 68 tramos de análisis y se consideraron 5 tramos adicionales en los caños Correa, Matunilla y Lequerica, para tener una representación más precisa del sistema, en particular de los desbordes de caudal lateral a lo largo del Canal.

Los tramos de análisis fueron definidos teniendo en cuenta la localización de la confluencia de los caños y cuerpos de agua lagunares, así como la localización de estaciones hidrográficas y la ubicación de compuertas y secciones transversales contraídas evaluadas en el presente estudio. La mayor parte del modelo está dividido en tramos de un kilómetro, pero en las zonas donde se identificó que no existían desbordes o algún tipo de conexión con otros cuerpos de agua, se utilizaron tramos de análisis de mayor longitud. La descripción de los 68 tramos considerados se presenta en la Tabla 3-1 con el fin de dejar el registro y memoria de la actualización del modelo integrado (CORMAGDALENA-UNAL, 2007b).

Tabla 3-1: Descripción de los tramos de análisis en el Canal del Dique

Tramo No	Descripción Tramo (de - a)	Abscisas (km)	Longitud del Tramo (km)
1	Calamar (Inicio contracción No.1)- Kilómetro 1	0 - 1.0	1.0
2	Kilómetro 1 - Kilómetro 2	1.0 - 2.0	1.0
3	Kilómetro 2 - Kilómetro 3	2.0 - 3.0	1.0
4	Kilómetro 3 - Kilómetro 4	3.0 - 4.0	1.0
5	Kilómetro 4 - Kilómetro 5	4.0 - 5.0	1.0
6	Kilómetro 5 - Fin contracción No.1	5.0 - 6.0	1.0
7	Fin contracción No.1 - Estación Incora K7	6.0 - 7.0	1.0
8	Estación Incora K7 - Kilómetro 8	7.0 - 8.0	1.0

Tabla 3-1: Descripción de los tramos de análisis en el Canal del Dique

Tramo No	Descripción Tramo (de - a)	Abscisas (km)	Longitud del Tramo (km)
9	Kilómetro 8 - Santa Lucia	8.0 - 9.0	1.0
10	Santa Lucia - Kilómetro 12	9.0 - 12.0	3.0
11	Kilómetro 12 - Distrito de Riego Santa Lucia	12.0 - 15.0	3.0
12	Distrito de Riego Santa Lucia - Conexión Ciénaga de Jobo	15.0 - 19.5	4.5
13	Conexión Ciénaga de Jobo - Kilómetro 23	19.5 - 23.0	3.5
14	Kilómetro 23 - Entrada embalse del Guájaro	23.0 - 25.5	2.5
15	Entrada embalse del Guájaro - Kilómetro 28	25.5 - 28.0	2.5
16	Kilómetro 28 - Salida del Guájaro	28.0 - 31.0	3.0
17	Salida del Guájaro – Soplaviento	31.0 - 33.0	2.0
18	Soplaviento - Kilómetro 33	33.0 - 35.0	2.0
19	Kilómetro 33 - Kilómetro 36.5	35.0 - 37.0	2.0
20	Kilómetro 37 - Nueva conexión propuesta ciénaga de Capote	37.0 - 38.0	1.0
21	Nueva conexión propuesta ciénaga de Capote - Conexión Ciénaga de Tupe	38.0 - 41.8	3.8
22	Conexión Ciénaga de Tupe - Kilómetro 42.5	41.8 - 42.5	0.7
23	Kilómetro 42.5 - Conexión Ciénaga La Luisa (Inicio contracción No.2)	42.5 - 43.0	0.5
24	Inicio contracción No.2 - Kilómetro 45	43.0 - 45.0	2.0
25	Kilómetro 45 - Kilómetro 46	45.0 - 46.0	1.0
26	Kilómetro 46 - Kilómetro 47	46.0 - 47.0	1.0
27	Kilómetro 47 - Fin contracción No.2	47.0 - 48.0	1.0
28	Fin contracción No.2 - Kilómetro 49	48.0 - 49.0	1.0
29	Kilómetro 49 - Kilómetro 50	49.0 - 50.0	1.0
30	Kilómetro 50 - Kilómetro 51	50.0 - 51.0	1.0
31	Kilómetro 51 - Conexión Ciénaga de Zarzal	51.0 - 52.0	1.0
32	Conexión Ciénaga de Zarzal - Kilómetro 54	52.0 - 54.0	2.0
33	Kilómetro 54 - Kilómetro 55	54.0 - 55.0	1.0
34	Kilómetro 55 - Kilómetro 57	55.0 - 57.0	2.0
35	Kilómetro 57 - Conexión Ciénaga de Matuya	57.0 - 59.0	2.0
36	Conexión Ciénaga de Matuya - Nueva conexión propuesta ciénaga de Aguas Claras	59.0 - 61.0	2.0
37	Nueva conexión propuesta ciénaga de Aguas Claras - Kilómetro 63	61.0 - 63.0	2.0
38	Kilómetro 63 - Conexión Ciénaga de Aguas Claras	63.0 - 65.4	2.4

Tabla 3-1: Descripción de los tramos de análisis en el Canal del Dique

Tramo No	Descripción Tramo (de - a)	Abscisas (km)	Longitud del Tramo (km)
39	Conexión Ciénaga de Aguas Claras - Gambote	65.4 - 66.0	0.6
40	Gambote - Kilómetro 68	66.0 - 68.0	2.0
41	Kilómetro 68 - Kilómetro 70	68.0 - 70.0	2.0
42	Kilómetro 70 - Inicio de contracción No.3	70.0 - 72.0	2.0
43	Inicio de contracción No.3 - Sistema Carabalí – La Cruz	72.0 - 73.0	1.0
44	Sistema Carabalí - La Cruz - Kilómetro 74	73.0 - 74.0	1.0
45	Kilómetro 74 - Kilómetro 75	74.0 - 75.0	1.0
46	Kilómetro 75 - Kilómetro 76	75.0 - 76.0	1.0
47	Kilómetro 76 - Fin de contracción No.3	76.0 - 77.0	1.0
48	Fin de contracción No.3 - Kilómetro 78	77.0 - 78.0	1.0
49	Kilómetro 78 - Kilómetro 79	78.0 - 79.0	1.0
50	Kilómetro 79 - Conexión libre Ciénaga de Juan Gómez	79.0 - 80.0	1.0
51	Conexión libre Ciénaga de Juan Gómez – Conexión controlada compuertas	80.0 - 81.5	1.5
52	Ciénaga de Juan Gómez – Estación Santa Helena I (Conexión Caño Correa)	81.5 - 82.5	1.0
53	Estación Santa Helena I - Kilómetro 83.5	82.5 - 83.5	1.0
54	Kilómetro 83.5 - Estación Santa Helena II	83.5 - 84.5	1.0
55	Estación Santa Helena II - Kilómetro 86	84.5 - 86.0	1.5
56	Kilómetro 86 - Kilómetro 88	86.0 - 88.0	2.0
57	Kilómetro 88 - Kilómetro 90	88.0 - 90.0	2.0
58	Kilómetro 90 - Vieja conexión Ciénaga de Palotal	90.0 - 92.0	2.0
59	Conexión Ciénaga de Palotal – Kilómetro 94	92.0 - 94.0	2.0
60	Kilómetro 94 - Kilómetro 96	94.0 - 96.0	2.0
61	Kilómetro 96 - Kilómetro 98	96.0 - 98.0	2.0
62	Kilómetro 98 - Conexión Caño Matunilla	98.0 - 100.0	2.0
63	Conexión Caño Matunilla - Kilómetro 101	100.0 - 101.0	1.0
64	Kilómetro 101 - Kilómetro 102	101.0 - 102.0	1.0
65	Kilómetro 102 - Kilómetro 103	102.0 - 103.0	1.0
66	Kilómetro 103 - Compuerta propuesta No.1	103.0 - 104.0	1.0
67	Kilómetro 104 - Conexión Caño Lequerica	104.0 - 108.0	4.0
68a	Conexión Caño Lequerica - Compuerta propuesta No.2	108.0 - 110.0	2.0
68b	Conexión Caño Lequerica - Pasacaballos	108.0 - 115.0	7.0

3.2.2. Revisión de datos de interconexiones ciénaga-canal

Utilizando los datos de la campaña topo batimétrica se revisaron y actualizaron los datos de las interconexiones ciénaga – canal del modelo integrado CORMAGDALENA-UNAL (2007b). El levantamiento de los caños de interconexión comprendió la determinación de las características geométricas relacionadas en la Figura 3-2. W = Ancho del canal de interconexión; L = Longitud de canal de interconexión; h = Profundidad del agua en la ciénaga; y = Profundidad del flujo en el Canal del Dique; P_{ci} = Profundidad del fondo a la entrada del caño de interconexión en la dirección ciénaga-canal; y P_{ca} = Profundidad del fondo a la entrada del caño de interconexión en la dirección canal-ciénaga.

En la Tabla 3-2 se resumen las variables de cálculo de caudal en las interconexiones actualizadas, y en el Anexo B se presentan las secciones transversales correspondientes.

Figura 3-2: Variables de cálculo de caudal en la interconexión

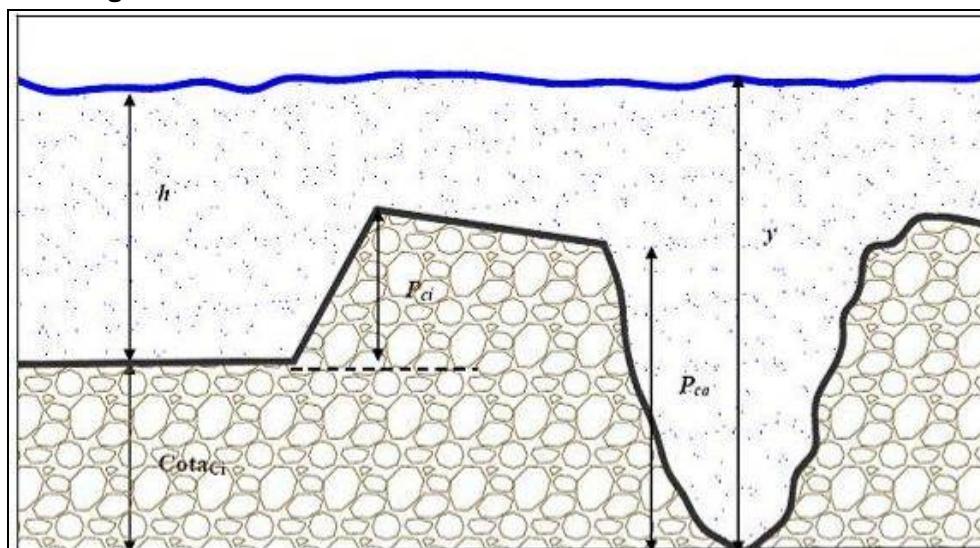


Tabla 3-2: Parámetros de las Ciénagas

Caño o Interconexión	W (m)	P_{ci} (msnm)	P_{ca} (msnm)	y (msnm)	h (msnm)	L (m)
Caño Jobo (K19.5)	4	2.39	4.25	7.09	-	2900
Interconexión - La Luisa (K 41.8)	6	5.04	5.11	5.86	-	-
Compuerta Tupe (K 41.8)	4	4	4	5.86	-	-
Interconexión – Zarzal (K48.6)	3	4.11	4.11	5.18	5.15	6
Caño Mahates (Capote-Tupe-Zarzal K 52)	4	3.96	2.97	5.15	4.97	2000
Interconexión – Matuya (K 61)	2.5	2.41	-	4.40	-	-
Interconexión – Aguas Claras (K 65)	6	2.83	2.38	3.84	3.87	270
Interconexión – Palotal (K 84)	2.5	1.68	2.07	2.40	-	-

En este estudio la simulación de alternativas de disminución de caudal se ha realizado con los parámetros optimizados de las interconexiones Ciénaga – Canal en cuanto al ancho de la interconexión W y su altura P_{ci} utilizados en el estudio CORMAGDALENA-UNAL (2007a, 2007b). En la Tabla 3-3 se presentan los valores finales adoptados para la Alternativa 2, “Condición actual mejorada” del estudio mencionado. Dichos valores permitieron optimizar las condiciones del Índice de Estado Limnológico Parcial IEELP aumentando la cantidad de agua de intercambio en los canales de conexión ciénaga – canal. Esto se logró mediante un mayor ancho de canal W de interconexión y una menor altura de paramento P_{ci} (dragado del canal). Las ciénagas donde no se aumentó el tamaño del canal de interconexión son Jobo, Aguas Claras y María la Baja, para las cuales, las buenas condiciones limnológicas actuales no pudieron ser mejoradas sustancialmente CORMAGDALENA-UNAL (2007a). Los mismos valores de los parámetros de la Tabla 3-3 se utilizan para la simulación de las Alternativas de disminución de caudal del presente estudio.

Tabla 3-3: Parámetros hidráulicos conexiones ciénaga - canal optimizados

Ciénaga	Ancho Canal Interconexión W (m)		Altura Paramento Interconexión P_{ci} (m)	
	Condición Actual	Condición Actual Mejorada	Condición Actual	Condición Actual Mejorada
Jobo	10	10	1.5	2
Capote-Tupe	8	20	2	1.75
Luisa	2	12	3	2
Zarzal	12	18	2	1.5
Matuya	3	12	2.3	1.2
Aguas Claras	9	7	2	2
Carabalí – Cruz	4	12	3	1.15
Juan Gómez	3	4	3	2
Palotal	7	3	2	2
María La Baja	20	20	1	1
La Honda	3	8	3.5	3

3.2.3. Resultados del proceso de re-calibración del modelo hidráulico

El modelo con los datos actualizados y utilizando la discretización hidráulica más detallada fue recalibrado. En la calibración de la componente hidráulica del modelo se utilizaron los hidrogramas de caudal diarios observados en las estaciones limnimétricas de Calamar, Incora, Gambote, Santa Helena 1 y Santa Helena 2 correspondiente a la serie de tiempo continua de enero de 1988 a diciembre de 1991. El modelo se validó con otra serie de tiempo continua de seis años, correspondiente a la serie correspondiente al periodo de enero de 1992 a diciembre de 1997. Es importante notar que desafortunadamente no existen estaciones con registros confiables en la zona baja del Canal del Dique y los caños Correa, Lequerica y Matunilla que permitan la calibración del modelo en esta zona.

Para representar de una manera más precisa el complejo cenagoso del Canal del Dique, y con ello los caudales de intercambio y todas las variables hidráulicas sobre el Canal, se aumentaron los tramos de análisis empleados en el estudio CORMAGDALENA-UNAL (2007) de una división de 18 a 68 tramos de análisis para la zona representada por el Canal del Dique y de 5 tramos para los caños Correa, Matunilla y Lequerica.

La metodología de calibración utilizada se basó en simulaciones de MonteCarlo (Céspedes y Camacho, 2004) y UNIANDES-ACUAGYR (2005), utilizando el método GLUE (Beven y Binley, 1992). Los parámetros efectivos de calibración del modelo para cada tramo entre estaciones hidrométricas son: el coeficiente de rugosidad n -Manning, y el coeficiente de descarga de vertedero lateral, C_d , con el cual se modela el caudal de desborde lateral de cada subtramo del Canal del Dique hacia las ciénagas.

Los resultados de la calibración del modelo por tramos del Canal del Dique entre estaciones hidrométricas se resumen, en la Tabla 3-4. Como función objetivo de bondad de ajuste se presenta el coeficiente de determinación de Nash y Sutcliffe (1970). Los resultados se presentan en forma gráfica en la Figura 3-3 para el periodo de calibración en los tramos Incora K7 - Gambote, Gambote - Santa Helena 1 y Santa Helena 1 – Santa Helena 2, respectivamente.

Tabla 3-4: Resultados de calibración del modelo hidráulico

Tramo	Calibración R^2
Incra K7 – Gambote	0.9962
Gambote – Santa Helena 1	0.9715
Santa Helena 1 – Santa Helena 2	0.9407

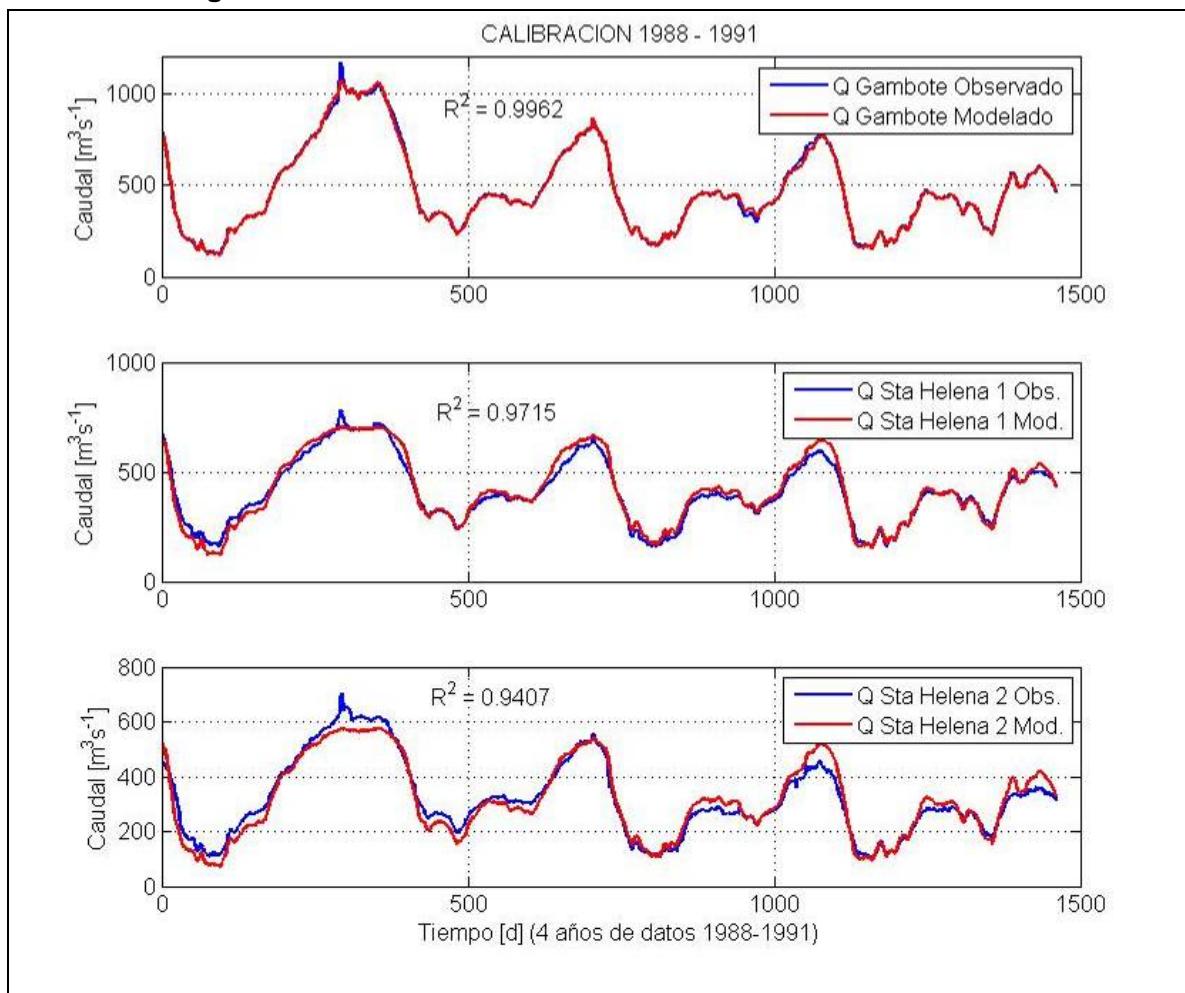
Los resultados de calibración ($R^2 = 0.9962$) en el tramo de Incra K-7 a Gambote se consideran muy buenos, ya que reflejan que las interacciones ciénaga – canal y los caudales de desborde de la parte alta están muy bien representados en el modelo.

Por su parte, los buenos resultados obtenidos en el tramo entre Gambote y Santa Helena 1 indican que los desbordes de esta zona media están bien representados. Finalmente, los buenos resultados de calibración obtenidos en la estación Santa Helena 2 demuestran que la derivación de caudales en la bifurcación del canal del Dique hacia el caño Correa es correcta en el modelo.

Los caudales de desborde se han concentrado en el modelo en los sitios identificados durante las salidas en campo, y están concentrados principalmente para el tramo Incra K-7 hasta Gambote en la zona media-baja, y para la zona de Gambote y Santa Helena 1 y Santa Helena 1 a Santa Helena 2 distribuidos de una manera más o menos uniforme.

Para la modelación de la componente de calidad del agua y limnología de las ciénagas se utilizaron en este estudio las mismas constantes cinéticas y tasas de reacción calibradas en el proyecto CORMAGDALENA-UNAL (2007a, 2007b).

Figura 3-3: Calibración modelo hidráulico - Periodo 1988-1991



3.3. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE ALTERNATIVAS EN EL CANAL DEL DIQUE

Con el modelo integrado apropiadamente calibrado se realizó la evaluación matemática de alternativas de reducción del caudal en el Canal del Dique como escenario de manejo hidrosedimentológico del Canal y su sistema lagunar. Este proceso se realizó cuidadosamente, desde la formulación conceptual e implementación de las alternativas y la entrada de datos al modelo, hasta el análisis y pos-procesamiento de resultados con el fin de obtener conclusiones correctas, que permitan apoyar la evaluación de impactos y la factibilidad técnica de reducción del caudal en el Canal y el control de los sedimentos que alcanzan la Bahía de Cartagena.

Con la herramienta matemática se cuantificó la disminución del caudal que se alcanza mediante la alternativa de construcción de angostamientos de la sección transversal en tramos rectos a lo largo del Canal y se evaluó el comportamiento hidráulico, de calidad del agua y limnológico resultante en el sistema.

A su vez se cuantificó el efecto de construcción de la compuerta-esclusa de Paricuica aguas abajo del Canal del Dique en el sector del Recreo con el fin de controlar totalmente los caudales y sedimentos de entrada a la Bahía de Cartagena. Específicamente se modeló el comportamiento del sistema para dos alternativas de sitios de localización de dicha compuerta-esclusa. La primera localización entre los caños Matunilla y Lequerica sugerida en el Kilómetro 104 del Canal (RK 104) por la compañía CNR (CNR-CORMAGDALENA, 2007) y la segunda en el Kilómetro 110 aguas abajo del Caño Lequerica.

También se modelaron alternativas combinadas de construcción de angostamientos a lo largo del canal y la construcción simultánea de la compuerta de Paricuica.

Mediante el modelo integrado calibrado se cuantificaron los efectos hidráulicos, de calidad del agua y limnológicos de las obras alternativas, tales como reducción o aumento de caudal y sus implicaciones en los volúmenes de intercambio en los caños de conexión canal – ciénaga, así como las implicaciones del aumento de los hidrogramas de caudal en los caños Correa, Matunilla, Lequerica. Los impactos hidráulicos y sedimentológico en la zona costera de la desembocadura del Caño Correa y sobre la bahía de Barbacoas, se evaluaron por parte del Grupo de Investigación Oceánicos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional sede Medellín y se presentan en el Capítulo 0 del presente trabajo.

3.3.1. Alternativas simuladas matemáticamente

El ejercicio de modelación matemática del presente proyecto incluyó el montaje, simulación y análisis de las siguientes condiciones y alternativas:

- Condición actual de referencia sin angostamientos ni compuerta-esclusa
- Alternativa 2: Canal del Dique solamente con compuerta-esclusa en el RK104
- Alternativa 3: Canal del Dique con angostamientos de la sección transversal
- Alternativa 4: Canal del Dique con angostamientos y compuerta-esclusa en el RK104
- Alternativa 5: Canal del Dique solamente con compuerta-esclusa en el RK110
- Alternativa 6: Canal del Dique con angostamientos y compuerta-esclusa en el RK110

La condición actual de referencia corresponde al escenario de modelación de los hidrogramas de caudal diarios observados en la estación limnimétrica de Calamar e Incora, correspondiente a la serie de tiempo continua de cuatro años de enero de 1988 a diciembre de 1991 con los datos de cotas y secciones naturales actuales sin obras de disminución de caudal.

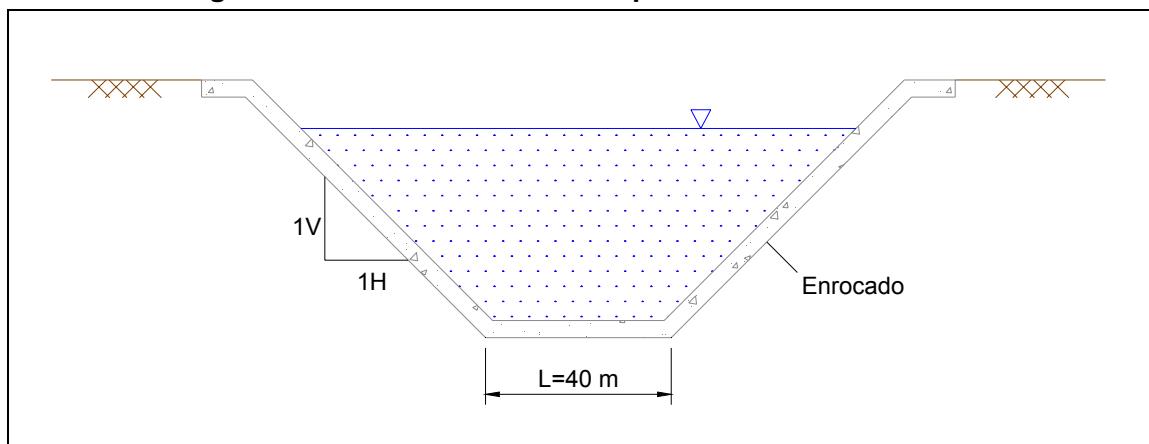
Teórica y conceptualmente los angostamientos de la sección transversal del Canal del Dique en algunos tramos tienen el potencial de producir el efecto de disminución del caudal que entra al Canal, y de mantener altos los niveles de agua por el efecto de remanso que generan hacia aguas arriba. Estas dos condiciones se consideran potencialmente favorables como alternativa para el manejo hidrosedimentológico del sistema pues la reducción del caudal genera una disminución efectiva del aporte de los caudales sólidos y sedimentos, y los niveles de agua altos favorecen el intercambio de agua que es necesario entre el Canal y las ciénagas.

En las alternativas evaluadas A3, A4 y A6 los angostamientos en las secciones transversales del Canal (o contracciones) están localizados y tienen una longitud dada por:

Angostamiento No. 1:	Km 0 - Km 6	Longitud = 6 Km
Angostamiento No. 2:	Km 45 - Km 48	Longitud = 5 Km
Angostamiento No. 3:	Km 72 - Km 77	Longitud = 5 Km

Estos angostamientos se definieron iterativamente a partir de un amplio número de simulaciones y escenarios preliminares que permitieron definir su mejor localización y longitud para generar los dos efectos deseados. A lo largo de los angostamientos se definió una sección transversal trapezoidal con una base de 40 m de ancha y un talud 1V:1H. La sección típica de los angostamientos se presenta en la Figura 3-4 y la localización de los mismos en tramos rectos del Canal del Dique se muestra en la Figura 3-5.

Figura 3-4: Sección transversal típica de las contracciones



Si bien los angostamientos de la sección transversal restringen la navegación del flujo de las embarcaciones y convoyes grandes en un solo sentido, este impacto se considera menor, toda vez que la frecuencia de viajes no es muy alta y con un ligero proceso de regulación en el tránsito de remolques-planchones puede ser fácilmente controlado (Ver Anexo G).

En el Anexo D se presenta la cuantificación de material de enrocado necesario para generar los angostamientos de las secciones transversales actuales a las propuestas (ver ejemplo Figura 3-6), el cual resulta ser de aproximadamente 5 millones de metros cúbicos para el talud especificado en la Figura 3-4.

Figura 3-5: Localización de los angostamientos

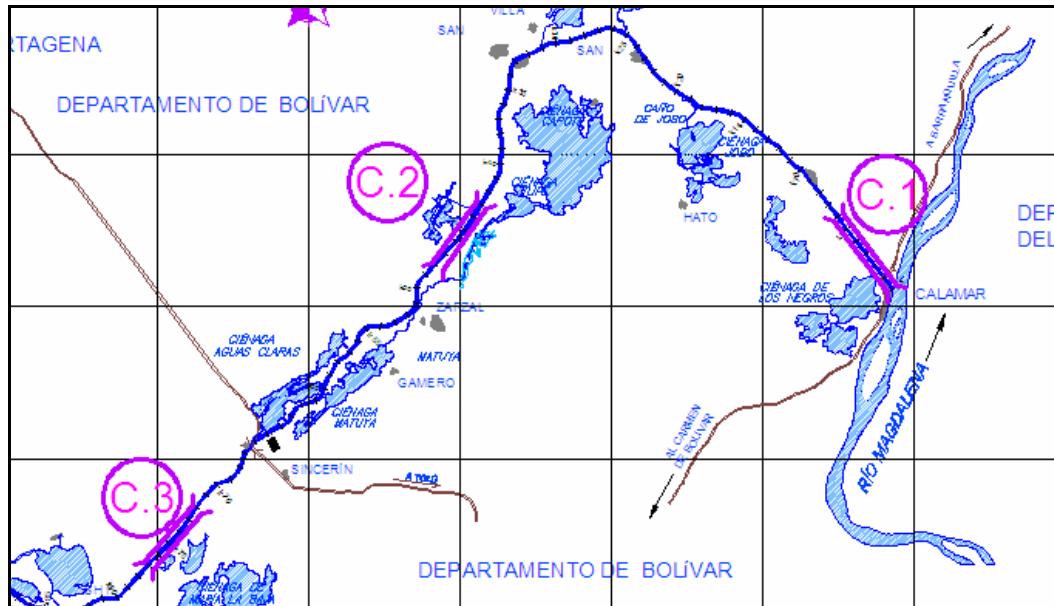
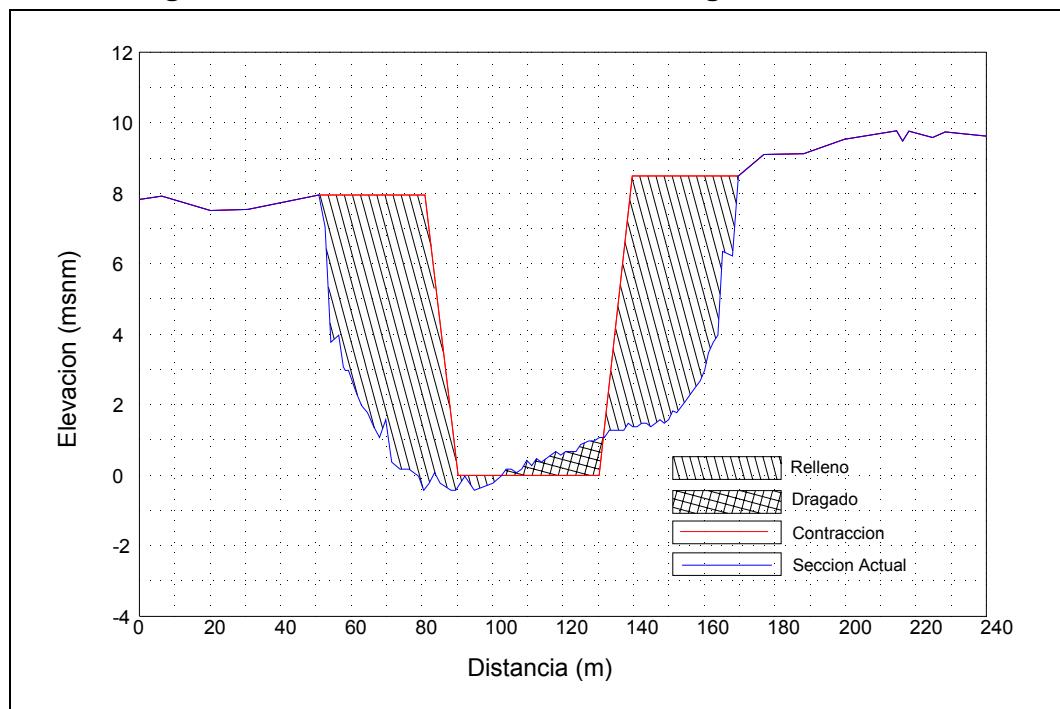


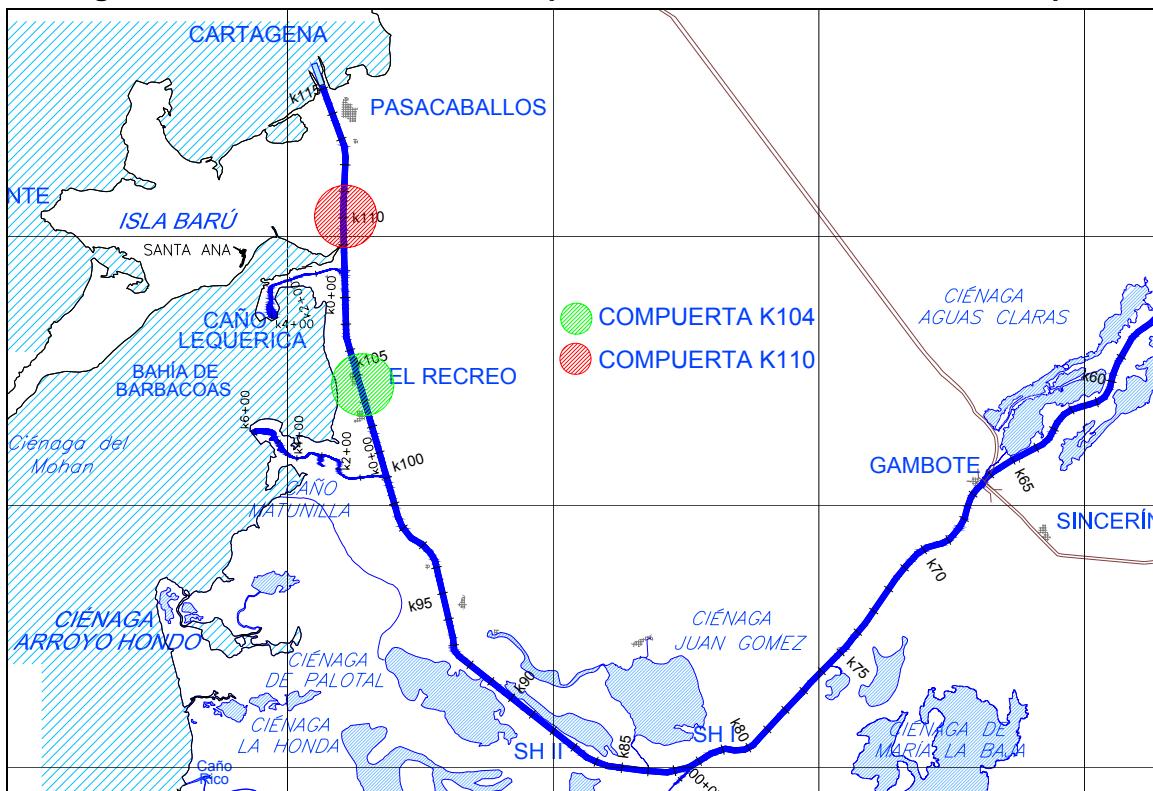
Figura 3-6: Sección transversal km 1 – Angostamiento No. 1



Por su parte en las Alternativas 2, 4, 5 y 6 se ha considerado la construcción de una compuerta-esclusa aguas abajo en el Canal del Dique que permita controlar el flujo de agua y sedimentos que llegue por Pasacaballos a la bahía de Cartagena, desviando dicho flujo

hacia la bahía de Barbacoas a través de los caños Matunilla y/o Lequerica. Se han considerado a nivel de evaluación preliminar de alternativas dos posibles sitios de localización de la compuerta-esclusa. El primer sitio preliminar, alternativas 2 y 4, es el propuesto en la zona del Recreo entre los caños Matunilla y Lequerica por CNR-CORMAGDALENA (2006) en el Kilómetro 104 del Canal del Dique (RK 104). El segundo sitio propuesto en este estudio, alternativas 5 y 6, está localizado en el Kilómetro 110 (RK 110) justo aguas abajo de la bifurcación del caño Lequerica para aprovechar la derivación del flujo hacia la Bahía de Barbacoas y controlar el flujo de agua y sedimentos que sigue hacia Pasacaballos (ver Figura 3-7).

Figura 3-7: Localización de las compuertas evaluadas en el Canal del Dique



La compuerta-esclusa evaluada en el Kilómetro RK104 tendría una profundidad de 5.80 m desde el lecho del canal hasta la corona, y una longitud aproximada en la cresta de 104 metros. En la Alternativa 2 que contempla solo la compuerta, se presenta un rango de variación de la profundidad en el K104 entre 5.13 y 5.14 metros, y de 5.12 y 5.14 metros en la Alternativa 4.

La compuerta-esclusa evaluada en el Kilómetro RK110 tendría una profundidad de 3.55 m desde el lecho del canal hasta la corona, y una longitud aproximada en la cresta de 94 metros. Los resultados encontrados en el modelo determinan que la profundidad tiene un rango de variación entre 3.54 y 3.56 metros en la Alternativa 5 en cercanías a la compuerta-

esclusa, y un rango de variación entre 3.53 y 3.55 en la Alternativa 6. Esta compuerta-esclusa resulta ser por lo tanto sustancialmente pequeña.

3.3.2. Datos de implementación de las alternativas en el modelo matemático

Los datos de cada alternativa de disminución de caudal fueron implementados en el modelo matemático integrado del Canal del Dique y su sistema lagunar. En primer lugar se establecieron los hidrogramas de caudal de cada alternativa en Calamar.

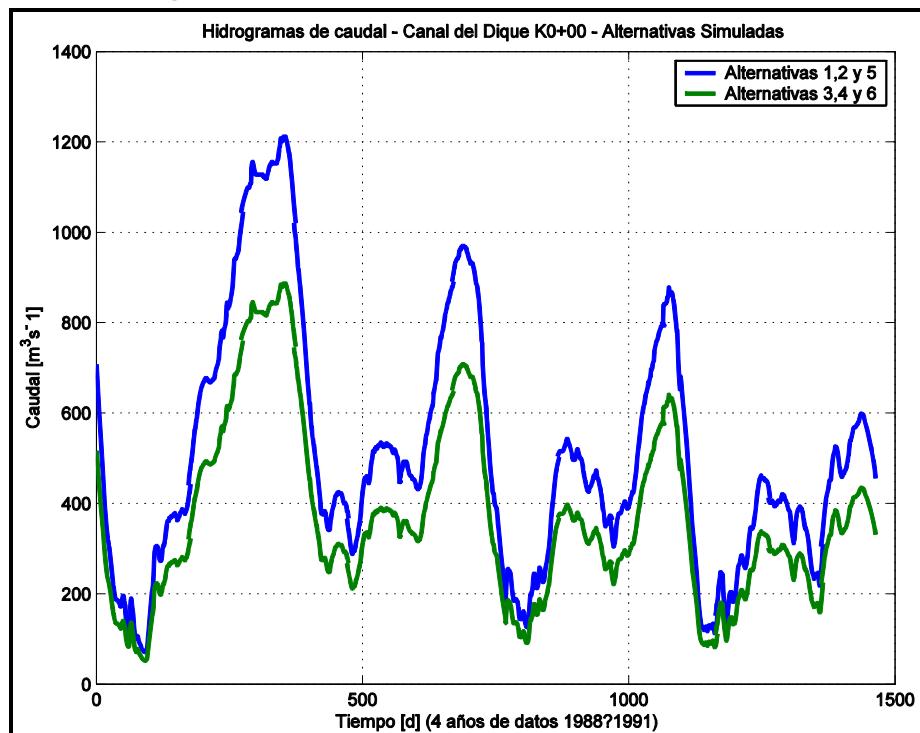
3.3.3. Hidrogramas de caudal

Los hidrogramas de caudal en la condición de frontera (Canal del Dique K0+00) considerados para las alternativas 1, 2 y 5 se presentan en la Figura 3-8. Se simulan las alternativas utilizando los datos del mismo periodo de calibración de 4 años de 1988 a 1991 del modelo hidráulico, para el cual existen datos hidrológicos completos de todas las ciénagas a nivel diario (ver informe CORMAGDALENA-UNAL, 2007c, CM - CD - 4).

Para establecer los hidrogramas de caudal de las alternativas de disminución de caudal que contemplan la construcción de angostamientos, alternativas 3, 4 y 6, se siguió un proceso riguroso de modelación mediante el modelo hidráulico HEC-RAS. Este proceso permitió establecer el porcentaje de disminución del caudal con respecto a la condición de referencia en los angostamientos. El Canal se modeló sin la interacción Canal-Ciénagas, tomando solo los caudales derivados por el río Magdalena en un rango en el cual no se producen desbordes laterales (Ver Anexo C).

Se simuló el río Magdalena como un embalse cuya descarga coincidiera con la curva de calibración registrada en la estación hidrométrica INCORA, ubicada en el kilómetro 7 aguas abajo del inicio del Canal del Dique. Se evaluaron 27 condiciones de caudales transportados por el canal con un rango entre $150 \text{ m}^3/\text{s}$ y $650 \text{ m}^3/\text{s}$ que cubren los valores registrados históricamente por las estaciones. Con estas simulaciones se estableció que para la condición evaluada de angostamientos se alcanza un 27% de disminución de caudal a la entrada del Canal del Dique respecto a la condición actual de referencia. Las hidrogramas de caudal en la condición de frontera para cada una de las alternativas simuladas se presentan en la Figura 3-8.

Figura 3-8: Hidrogramas de caudal de las alternativas (Canal del Dique K0+00)

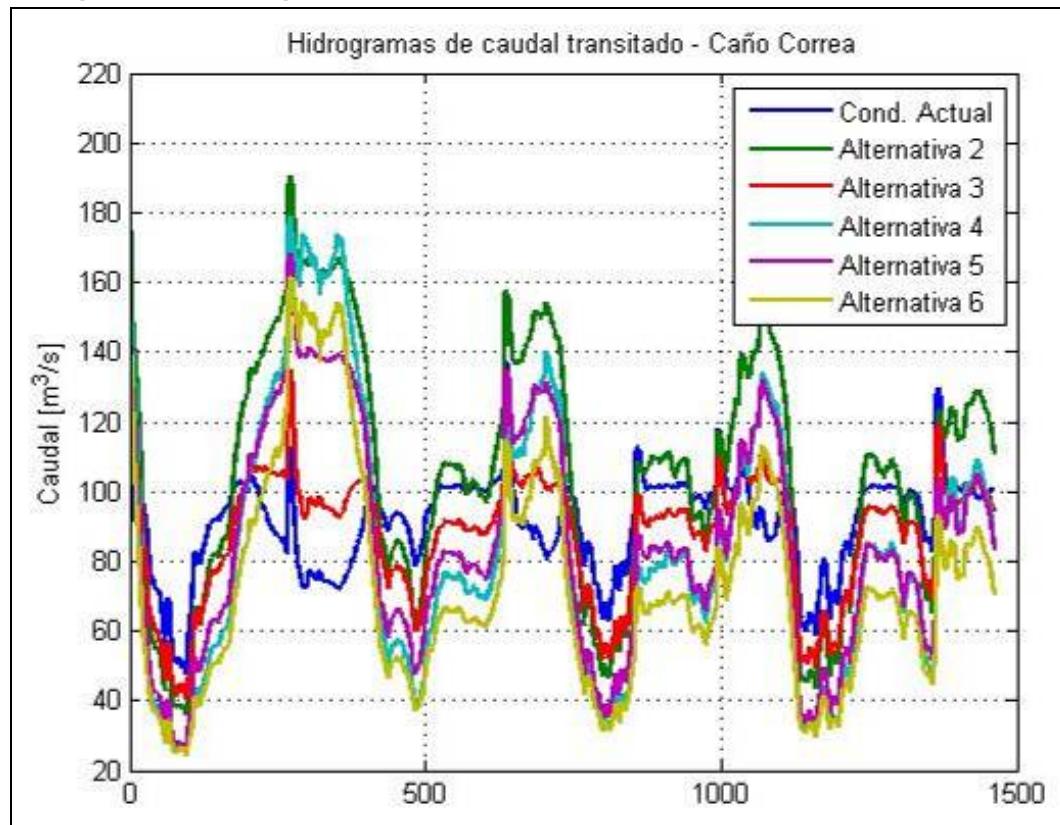


3.3.4. Cuantificación de los efectos hidráulicos de las alternativas de disminución de caudal

Con el fin de cuantificar los efectos hidráulicos de las alternativas se transita el hidrograma de caudales a la entrada en Calamar para el periodo de estudio de 4 años 1988 – 1991 hasta las desembocaduras del Canal del Dique. En las Figura 3-9 a Figura 3-12 se observan los hidrogramas de caudal transitados en las desembocaduras de los caños Correa, Matunilla, Lequerica y en la desembocadura en Pasacaballos.

En la Figura 3-9 se observa la influencia de las alternativas analizadas sobre los caudales en la desembocadura del caño Correa. Para la alternativa 2 de compuerta-esclusa localizada en el RK 104 se presenta un aumento sustancial de caudal respecto a la condición actual. En esta condición no existe reducción de caudal a la entrada en Calamar causada por el primer angostamiento y en cambio el efecto de remanso que genera la compuerta en el RK104 produce un nivel de agua alto en la bifurcación del caño Correa que causa una mayor derivación de flujo hacia el mar.

Figura 3-9: Hidrograma del caudal en la desembocadura del caño Correa



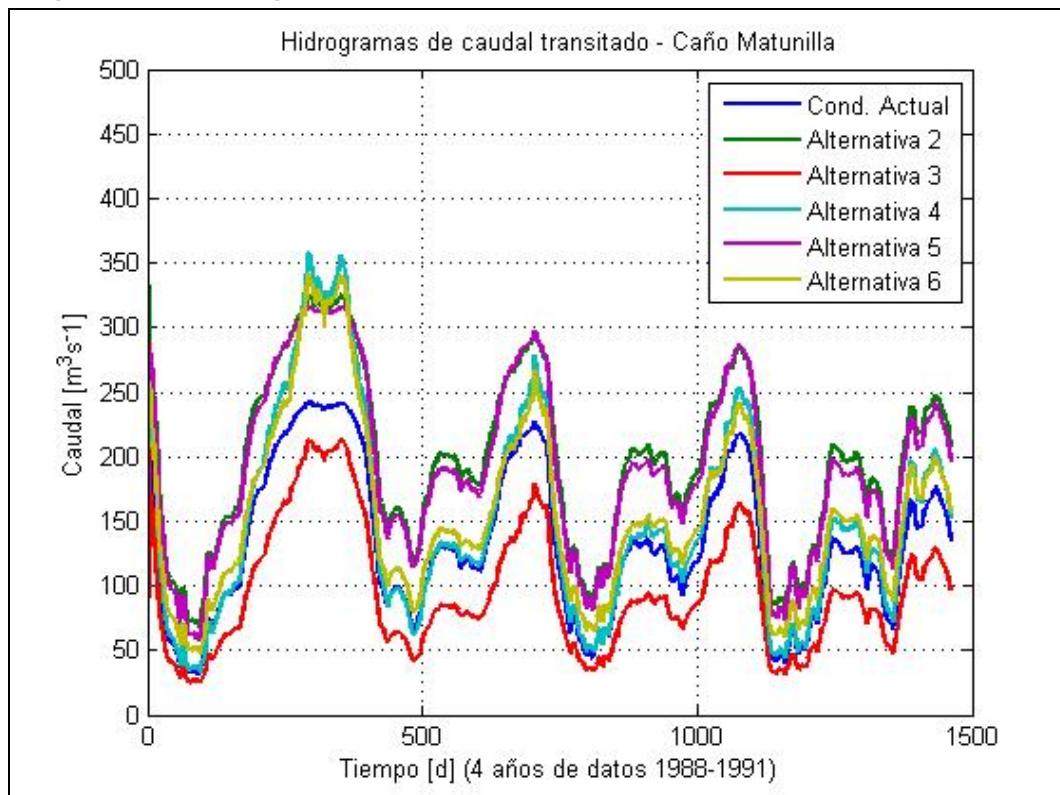
Por su parte la Alternativa 3 de solo angostamientos genera una condición de caudal más bajo que las condiciones actuales por el caño Correa. La razón de esto es que el primer angostamiento de 6 kilómetros a la entrada del Canal del Dique reduce el caudal de entrada en cerca del 27% y los angostamientos dos y tres producen niveles de agua altos que generan desbordes a las ciénagas del medio Canal. Como no se considera esclusa-compuerta en esta alternativa no hay efectos de remanso que aumenten el caudal del Caño.

Los resultados para la Alternativa 4 son interesantes pues el efecto combinado de disminución de caudal y niveles de agua altos causados, tanto por los angostamientos dos y tres como por el efecto de remanso de la compuerta-esclusa localizada en el RK 104 que genera desbordes sustanciales de agua, produce un resultado de caudal intermedio por el caño Correa menor al de la alternativa 2 sin agostamientos.

Los resultados de caudal para la Alternativa 5 y 6 están en un rango intermedio entre los valores de las alternativas 2 y 4 indicando que la localización de la compuerta-esclusa aguas abajo del caño Lequerica puede favorecer un comportamiento hidráulico más estable en la bifurcación del caño Correa. Esto es debido a que el efecto de remanso no se propaga hacia agua arriba generando niveles de agua altos ni desbordes excesivos porque el flujo se bifurca hacia la bahía de Barbacoas por los dos caños Matunilla y Lequerica.

En la Figura 3-10 se observa un aumento generalizado de caudal en la desembocadura en el caño Matunilla para las alternativas de compuerta-esclusa solamente (alternativas 2 y 5) y las combinaciones de compuerta-esclusa y angostamientos (alternativas 4 y 6). Solamente en la alternativa tres se presenta una disminución del caudal en este caño debido al efecto del primer angostamiento a la entrada del Canal de reducir el caudal y a que el flujo continúa su tránsito hacia Pasacaballos.

Figura 3-10: Hidrograma del caudal en la desembocadura del caño Matunilla



Para el caño Lequerica solo se muestran los resultados de las alternativas 3, 5 y 6 en la Figura 3-11, ya que la compuerta-esclusa del RK 104 contemplada en las alternativas 2 y 4 impide el flujo hacia el caño Lequerica y hacia Pasacaballos. En las alternativas 5 y 6 el caudal aumenta ostensiblemente en este caño requiriéndose de la adecuación de las secciones transversales mediante dragados y la construcción de diques laterales para impedir caudales de desborde altos e inundaciones indeseables.

En la alternativa 3 que se permite el libre flujo hacia Pasacaballos, ya que solamente se construirían los angostamientos, se puede observar que el caudal disminuye respecto de la condición actual por el efecto de las contracciones (ver Figura 3-12).

Figura 3-11: Hidrograma del caudal en la desembocadura del caño Lequerica

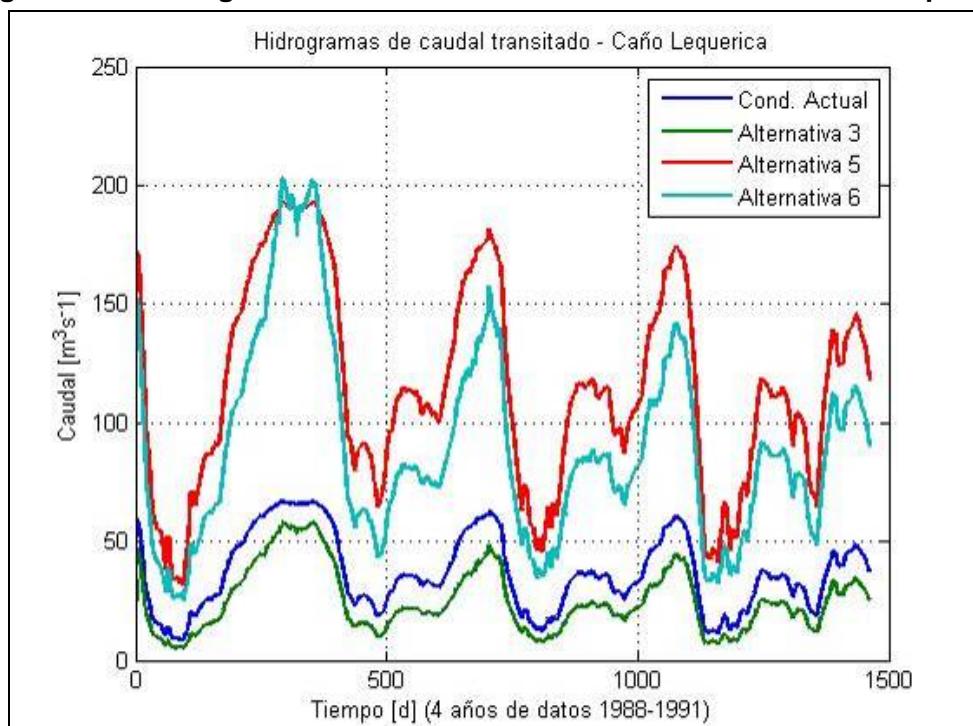
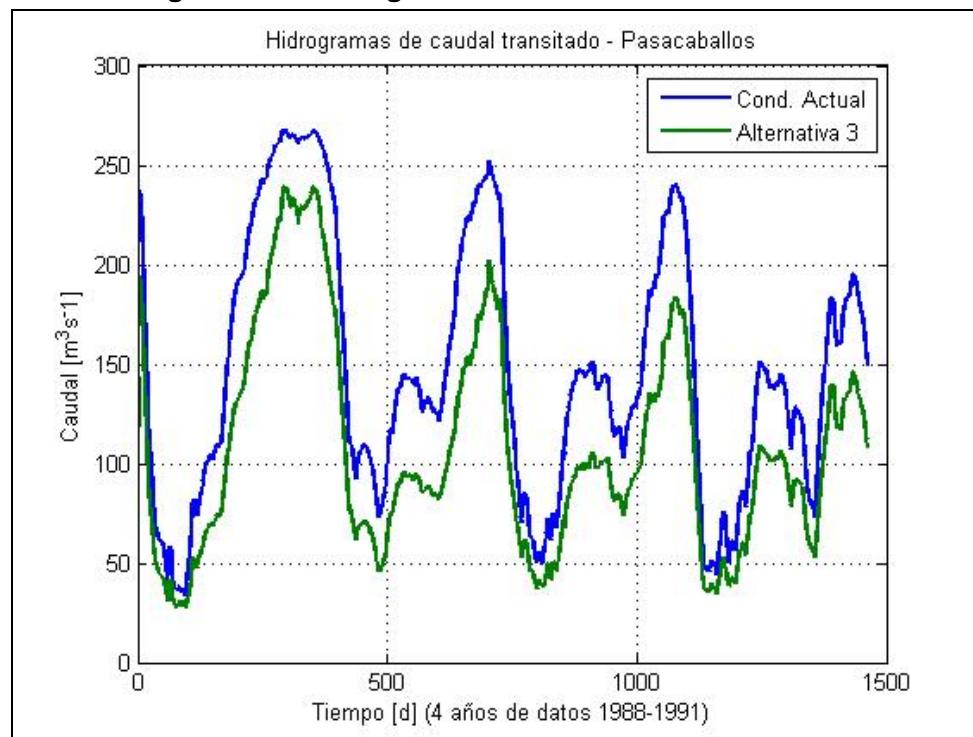


Figura 3-12: Hidrograma del caudal en Pasacaballos



En la Tabla 3-5 se presenta el volumen promedio anual de agua en el sistema para el periodo de cuatro años simulados. De los 16000 millones de metros cúbicos que entran en Calamar salen a las Bahías de Cartagena y Barbacoas y al Mar por el caño Correa, un total de 12800 millones (79.8%) para la condición actual, valor que difiere ligeramente del resultado presentado en el informe (CORMAGDALENA-UNAL, 2007b), debido a que en el presente estudio se actualizaron las secciones transversales del caño Correa con las que se representan de manera más precisa los desbordes en este caño. El efecto es que se obtienen menores volúmenes de desborde y por esta razón mayores volúmenes de agua en la desembocadura.

El porcentaje del volumen desbordado a la planicie inundable aumenta de manera notoria en la alternativa 2 con la compuerta-esclusa en el RK 104 sin disminución de caudal a la entrada al Canal, y disminuye a cerca de la mitad en las alternativas 3 y 6. Estos resultados muestran condiciones críticas ya que por un lado en la alternativa 2 se tendrían problemas con las inundaciones generadas, y en las alternativas 3 y 6 se disminuyen los volúmenes de intercambio ciénaga-canal afectándose el estado limnológico de las ciénagas. Considerando el criterio de mejorar o mantener las condiciones hidráulicas actuales del Canal del Dique y su sistema lagunar, las alternativas 5 y 4, serían las que producen los mejores resultados. Esto es de esperarse para la alternativa 5 pues la compuerta del kilómetro 110 genera una condición de frontera aguas abajo muy similar a la del nivel del mar en Pasacaballos o la Bahía de Cartagena.

Tabla 3-5: Balance hídrico anual aproximado

Volumen Promedio Anual de Agua en el Sistema 1988-1991 (Millones metros cúbicos)						
Sitio	Cond. Actual	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5	Alt. 6
Incora	16019	16020	11694	11694	16017	12014
Correa	2858	3316	2751	2642	2657	2301
Matunilla	4171	6186	3027	4822	6150	4987
Lequerica	1152	0	836	0	3688	2990
Pasacaballos	4608	-	3343	-	-	-
Total sale al mar	12789	9502	9957	7464	12495	10278
Desborde Planicie	3230	6518	1737	4230	3522	1736
Desborde Planicie (%)	20.2%	40.7%	10.8%	26.4%	22.0%	10.8%
Comparación Cond. Actual (%)	100%	202%	54%	131%	109%	54%

En la Tabla 3-6 se presenta el volumen promedio anual de agua que ingresa a la bahía de Barbacoas para los cuatro años simulados. En las alternativas 3 y 4 se tiene una reducción de ese volumen respecto a la condición de referencia. En el primer caso por la continuación del flujo hacia Pasacaballos y en el segundo por el mayor desborde aguas arriba.

Tabla 3-6: Volumen de agua que ingresa a la Bahía de Barbacoas 1988-1991
(Millones metros cúbicos)

Sitio	Cond. Actual	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5	Alt. 6
Correa	2858	3316	2751	2642	2657	2301
Matunilla	4171	6186	3027	4822	6150	4987
Lequerica	1152	0	836	0	3688	2990
Total sale Barbacoas	8181	9502	6614	7464	12495	10278
Comparación Cond. actual	100%	116%	81%	91%	153%	126%

La mayor afectación del caño Correa se causa en las alternativas 2 y 5 por el alto caudal aguas arriba y el efecto de remanso generado por la compuerta-esclusa aguas abajo. Para el resto de condiciones el volumen de agua que ingresaría a la bahía de Barbacoas sería menor o cercano al de las condiciones actuales.

En el caso del caño Matunilla aumenta el volumen de agua descargado hacia la bahía de Barbacoas en las condiciones 2 y 5 (alternativas que contemplan compuertas sin reducciones), teniéndose necesariamente que realizar una adecuación de la capacidad hidráulica de la sección transversal del caño mediante dragados y diques laterales de sobre elevación. En el caso del caño Lequerica se tienen condiciones desfavorables en las alternativas 5 y 6 que contemplan la compuerta en el K110. En la alternativa 3 el volumen de agua que se descarga en la Bahía de Barbacoas disminuye por la continuación del flujo hacia Pasacaballos.

En la Tabla 3-7 se presenta el volumen de intercambio, de entrada, salida y neto, por todos los canales de interconexión de las ciénagas. Se puede notar que para el periodo simulado se presenta un flujo neto de salida de las ciénagas. Esto es debido a que se modela un año muy húmedo y dos años mayores al promedio hidrológico seguidos de un año seco. Este no es un comportamiento típico ya que la regulación de caudales en el sistema es multianual. Periodos de años secos o de caudales promedio bajos presentarán flujo netos negativos del Canal del Dique hacia las ciénagas. Las alternativas 2 y 4 producen mayores flujos de intercambio del Canal del Dique con las ciénagas lo cual tiene el potencial de mejorar el estado limnológico con respecto a las condiciones actuales.

Tabla 3-7: Volúmenes de intercambio a través de los caños de conexión Canal - Ciénaga (Millones metros cúbicos)

	Cond. Actual	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5	Alt. 6
Volumen de entrada por interconexiones	4176	6528	3190	5624	4380	2757
Volumen de salida por interconexiones	6424	8927	5385	7897	6631	4833
Volumen neto por interconexiones	2248	2400	2195	2273	2251	2076

En la Figura 3-13 se registran los caudales igualados o excedidos el 50% y el 90% del tiempo desde Calamar hasta Pasacaballos. Se nota cómo, para las Alternativa 2 y 5 sin contracciones, se presentan los caudales más altos en el primer tramo. Para la condición 2 se genera una disminución de caudal mayor a la de la condición 5 sobre el kilómetro 82, debida a la mayor derivación de caudal hacia el caño Correa por el mayor efecto del remanso de la compuerta-esclusa del RK 104. La alternativa 5 mantiene un comportamiento muy semejante a la condición de referencia en este aspecto.

Es importante notar que el caudal mínimo igualado o excedido el 90% del tiempo de todas las alternativas es mayor a $50 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Este valor, por sí solo, es del orden de 5 veces mayor a la suma del caudal crítico de uso consuntivo demandado en la ecorregión, y solamente se reduce en los tramos aguas abajo de las esclusas-compuertas evaluadas.

En la Figura 3-14 se presenta la profundidad del flujo a lo largo del Canal del Dique, igualada o excedida el 50% del tiempo. Las Alternativas 2 y 4 que contemplan compuerta en el K104, generan las mayores profundidades del flujo especialmente en el último tramo en cercanías a la compuerta, situación que genera desbordes altos, que sugieren la necesidad de realización de obras de adecuación hidráulica consistentes en diques laterales y dragados desde el K80 al K104 donde se tiene influencia del remanso generado por la compuerta. En la Figura 3-14 se nota claramente la función de los angostamientos No.2 y No.3 de generar una sobre elevación del flujo que permita mantener los volúmenes de intercambio ciénaga-canal.

Figura 3-13: Caudales de excedencia a lo largo del Canal del Dique

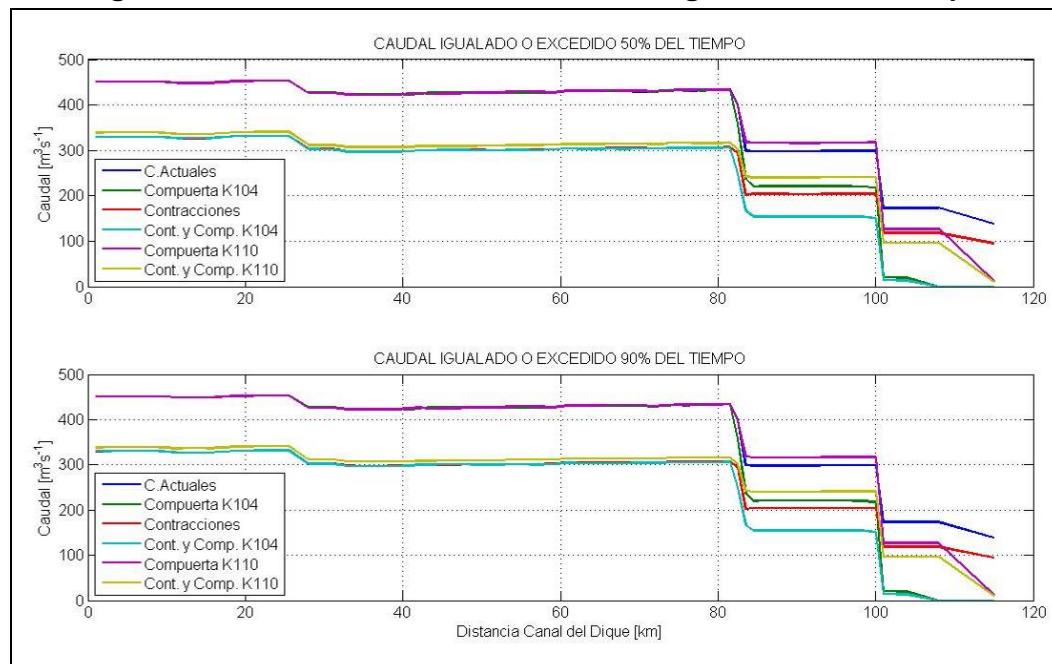
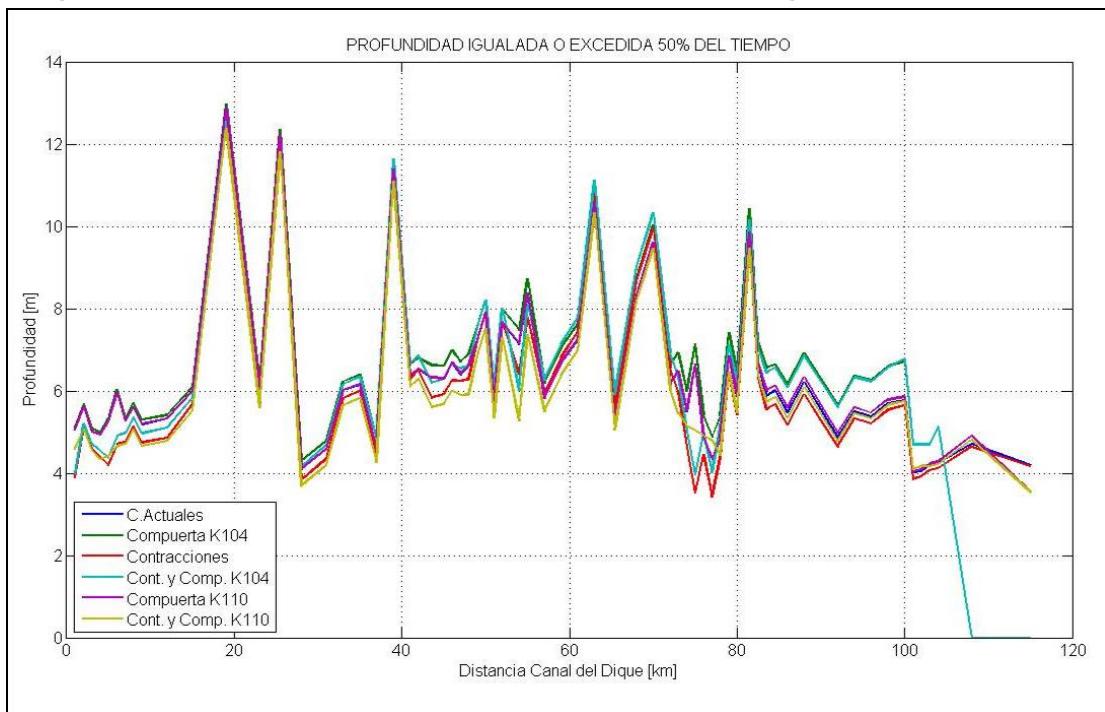


Figura 3-14: Profundidad del 50% de excedencia a lo largo del Canal del Dique



En la Tabla 3-8 se presentan los valores de profundidad igualada o excedida el 50% del tiempo en el periodo simulado de 1988 a 1991. Los resultados son consistentes por cuanto se presentan las mayores profundidades en las Alternativas 2 y 4 de mayor volumen de desborde y de intercambio. Cabe anotar que en la alternativa No.5 se tienen profundidades muy cercanas a la de la condición de referencia, situación que permite establecer que el estado limnológico de las ciénagas bajo esta condición no sería afectado.

Tabla 3-8: Profundidad de las ciénagas igualada o excedida el 50% del tiempo [m]

	Cond. Act.	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5	Alt. 6
JOBO	2.77	2.86	2.45	2.64	2.77	2.36
TUPE	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23	2.23
LUISA	3.40	3.38	3.38	3.38	3.40	3.38
ZARZAL	2.46	2.69	2.50	2.72	2.47	2.36
MATUYA	2.83	2.83	2.83	2.83	2.83	2.82
AG CLARAS	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12	2.12
CAR-C	3.89	4.20	3.71	3.84	3.89	3.63
J. GOMEZ	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34	3.34
PALOTAL	2.93	3.73	2.69	3.67	3.03	2.84
Ma BAJA	1.34	1.40	1.31	1.33	1.34	1.30

3.3.5. Cuantificación de la carga sólida en suspensión

El modelo matemático permite el tránsito de caudales y el transporte de sólidos suspendidos totales (SST) y otros determinantes de calidad del agua a través de todos los cuerpos de agua conectados. En particular se pueden obtener los hidrogramas de caudal en las desembocaduras al mar y las series de tiempo de concentración de SST.

La multiplicación e integración de las dos series de tiempo, caudal y concentración permite estimar la carga contaminante promedio transportada en un sitio de interés para un periodo de tiempo dado. En la Figura 3-15, Figura 3-16 y Figura 3-17 se presenta la carga en toneladas por día descargada a la Bahía de Barbacoas por los caños Correa, Lequerica y Matunilla, durante el periodo de simulación de 1988 a 1991.

La carga promedio anual aportada en Pasacaballos y los caños Correa, Lequerica y Matunilla se resume en la Tabla 3-9.

**Tabla 3-9: Carga promedio de sólidos en suspensión
(Millones de Ton/año)**

Escenario	Sitio			
	Correa	Matunilla	Lequerica	Pasacaballos
Cond. Actual	0.41	0.70	0.19	0.76
Alt. 2	0.45	0.80	-	-
Alt. 3	0.37	0.47	0.13	0.52
Alt. 4	0.36	0.69	-	-
Alt. 5	0.42	1.05	0.63	-
Alt. 6	0.39	0.88	0.53	-

De acuerdo con los resultados, en la Bahía de Barbacoas en la que actualmente ingresan en promedio 1.3 millones de Ton/año de SST, puede esperarse una reducción máxima de carga de sedimentos en suspensión del orden del 26% con la alternativa 3, pero bajo esta condición aun estarían ingresando 0.52 millones de Ton/año de SST por la Bahía de Cartagena, valor que representa el 68% de los sedimentos que están entrando actualmente por Pasacaballos. Es decir la alternativa 3 de construcción de angostamientos sin compuerta-esclusa reduce el 27% de caudal en Calamar generando una reducción en carga de sólidos en suspensión del 32% a la Bahía de Cartagena.

Con respecto a las alternativas que contemplan únicamente descarga de sedimentos hacia la Bahía de Barbacoas, se determina que para las alternativas 2 y 4, en las que se reduce el caudal de entrada al sistema aguas arriba, incluso se puede esperar una reducción de sedimentos en suspensión del orden del 4% y 20% respectivamente con respecto a las condiciones actuales. Estos resultados reflejan el efecto de atenuación en la carga de SST, por el aumento de los desbordes sobre la planicie de inundación generada por la compuerta en el K104. Esta situación se considera efectiva desde el punto de vista de manejo sedimentológico, ya que no solo se está controlando este problema en la Bahía de Cartagena, sino que se presentan condiciones aún mejores que las actuales por la reducción de caudal. En estas alternativas sin embargo, hay que tener en cuenta los potenciales

problemas asociados por las inundaciones generadas por el efecto de remanso de la compuerta entre los kilómetros 82 y K104. En el Anexo D, con el fin de resolver este problema se ha cuantificado los volúmenes de material requeridos para conformar diques perimetrales de sobre elevación de orillas en esta zona.

Por otro lado, para las alternativas 5 y 6 se tendría un aumento máximo del 61% y 38% en la carga de sedimentos en suspensión que entra a la Bahía de Barbacoas respecto a la condición de referencia. Esto debido a que la compuerta-esclusa desvía el flujo hacia esta Bahía y no se generan efectos de remanso tan altos y por ende desbordes tan altos como en la condición de la compuerta-esclusa en el RK 104 (alternativas 2 y 4). Debido a que la alternativa 5 presenta volúmenes de desbordes semejantes a los de la condición actual (ver Tabla 3-7), y un comportamiento hidráulico semejante, ocurre que los sedimentos en suspensión que alcanzan actualmente la Bahía de Cartagena se distribuyen por los caños Matunilla y Lequerica hacia a la Bahía de Barbacoas. Para la condición 6 se obtiene un aumento menor del 38% de los sólidos en suspensión descargados a la Bahía de Barbacoas producto de la disminución de caudal y los volúmenes de desborde respecto a la condición actual (ver Tabla 3-7). Se genera en esta alternativa un aumento en los picos de carga de SST (ver Figura 3-15, Figura 3-16 y Figura 3-17) por el menor efecto de los desbordes laterales y los caudales de intercambio en las interconexiones ciénaga-Canal.

Figura 3-15: Carga de SST del caño Correa (Toneladas por día)

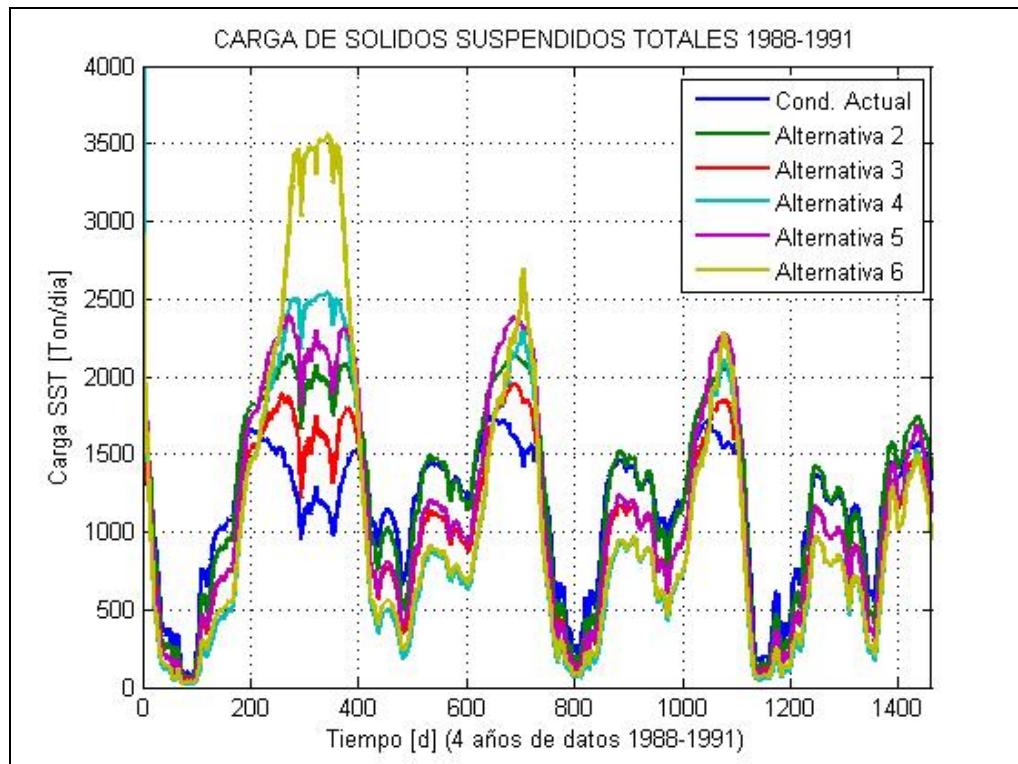


Figura 3-16: Carga de SST del caño Matunilla (Toneladas por día)

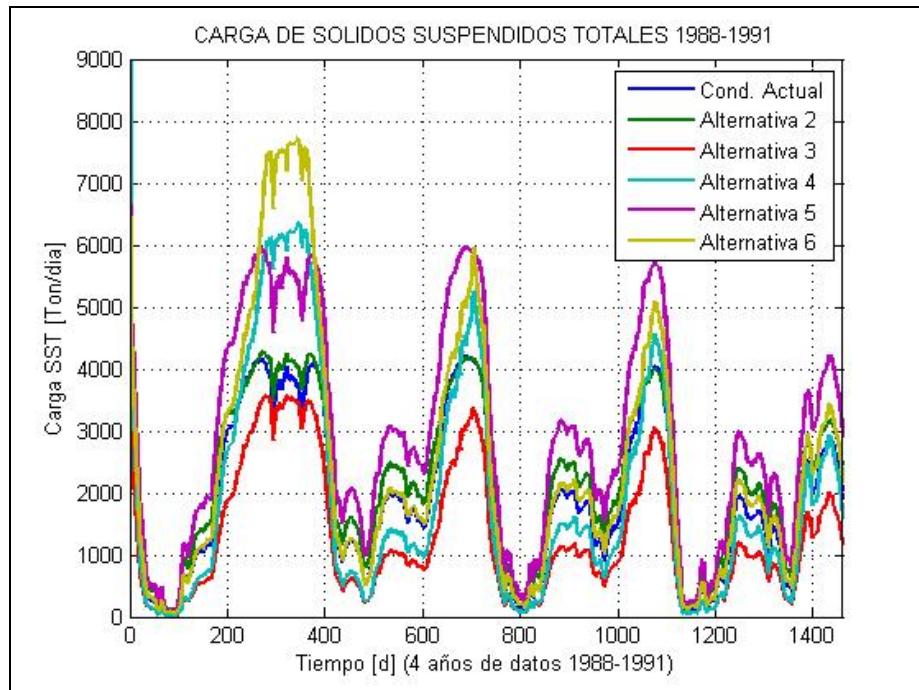
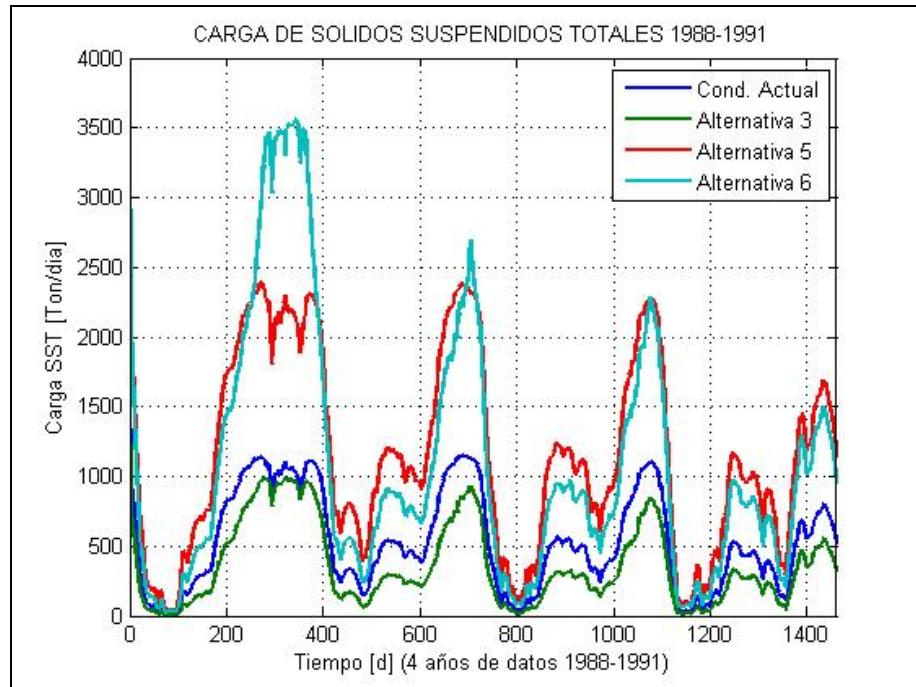


Figura 3-17: Carga de SST del caño Lequerica (Toneladas por día)



Mediante el modelo matemático se calcularon las cargas de SST por desborde, por entrada y salida de las ciénagas a través de los canales de interconexión y de los caños de derivación. El balance de SST debe incluir además la sedimentación en trampas, canales y el transporte por arrastre de fondo (ver Tabla 3-10).

Tabla 3-10: Balance de SST en el sistema

(Millones de toneladas por año)

	Cond. Actual	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5	Alt. 6
Carga de entrada Calamar	7.9	7.9	5.8	5.8	7.9	5.9
Desborde a la planicie y ciénagas	2.5	4.5	1.0	2.2	2.4	0.7
Entrada a ciénagas por canales interconexión	2.1	3.0	1.6	2.6	2.1	1.4
Salida por caño Correa	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Salida por caño Matunilla	0.7	0.8	0.5	0.7	1.1	0.9
Salida por caño Lequerica	0.2	0.0	0.1	0.0	0.6	0.5
Salida por CD Pasacaballos	0.8	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
Sedimentación en trampas, canales y salida por arrastre	1.2	-0.9	1.7	-0.1	1.2	2.1

3.3.6. Cuantificación de los efectos en la calidad del agua

Como se mencionó anteriormente, la variación de caudal a la entrada del sistema del Canal del Dique y el complejo lagunar, genera impactos en la calidad del agua. Se afectan, por ejemplo, las cargas de los determinantes de calidad del agua y el tiempo de retención hidráulico que determina el alcance de los procesos de transformación de los determinantes tales como, sedimentación, degradación de la materia orgánica, nitrificación e hidrólisis, entre otros. Por lo tanto, se pueden esperar cambios en la calidad del agua de las ciénagas, e incluso en los 115 km del Canal del Dique, para las diferentes alternativas. Debe notarse que esto se presenta, a pesar de que la calidad del agua del Río Magdalena en la condición de frontera a la entrada del Canal del Dique se ha considerado igual para todas las alternativas.

En la Tabla 3-11 se presenta el resumen de la carga total de diferentes determinantes de calidad del agua, en toneladas por año, vertida al mar en la bahía de Barbacoas. Se observa que desde el punto de vista de nutrientes y potencial de eutrofización en la Bahía la alternativa 4 es la que produce el menor impacto.

Tabla 3-11: Cargas de nutrientes y DBO vertida al mar en la bahía de Barbacoas

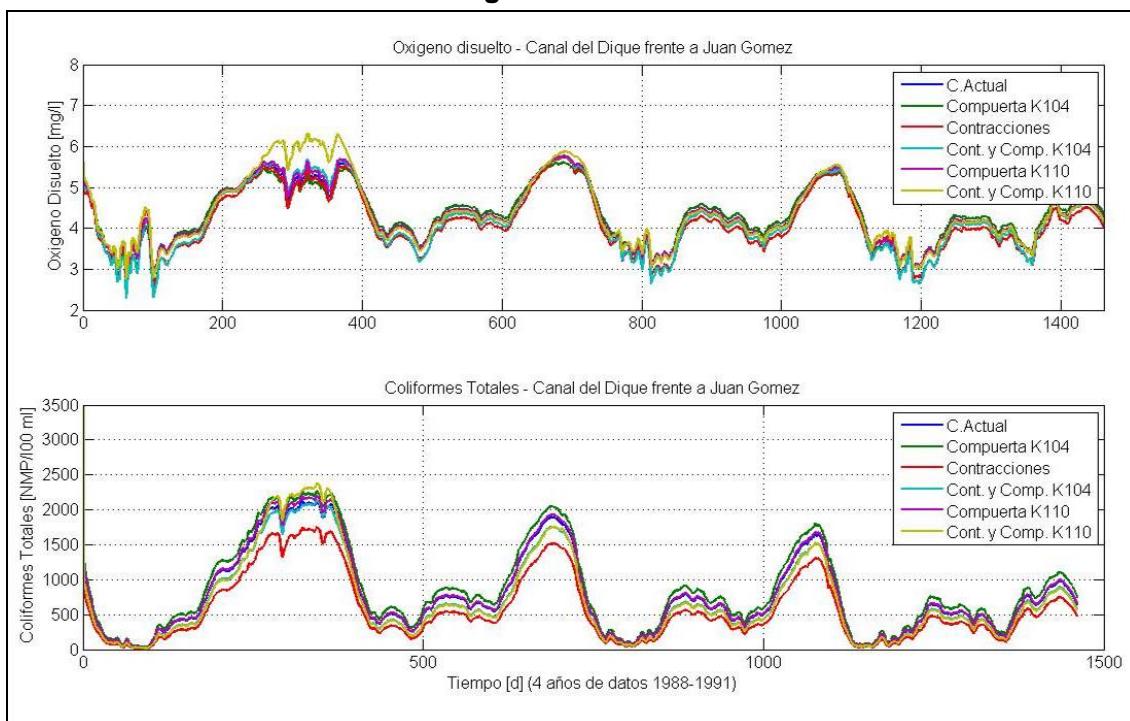
(Ton/año)

	Cond. Act.	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 5	Alt. 6
Carga de nitratos	43331	41297	36627	33769	65780	56483
Carga de fosfatos	7519	7079	5915	6980	11467	9594
Carga de DBO	54692	48274	43701	47693	83315	70764
Carga de Clorofila- a	73	66	60	56	110	93

En la Figura 3-18 se presentan resultados de la modelación de oxígeno disuelto y coliformes totales para el periodo de análisis en el kilómetro K81+500 del Canal del Dique, frente a la bocatoma de ACUACAR donde se realiza el bombeo a la ciénaga de Juan Gómez. Se observa una concentración mayor de oxígeno disuelto para la alternativa 6 de la compuerta-esclusa en RK110 con angostamientos en el Canal durante los periodos de invierno. Igualmente sucede con la concentración de coliformes totales lo cual, contrariamente al oxígeno disuelto, no es bueno desde el punto de vista de tratamiento.

Los cambios en la concentración son relativamente menores en todos los parámetros modelados debido a la alta capacidad de asimilación del Canal del Dique por su alto caudal y no se alcanzan a afectar los estándares de uso de agua.

Figura 3-18: Concentraciones de oxígeno disuelto y coliformes totales frente a la ciénaga de Juan Gómez



3.3.7. Cuantificación del avance de la cuña salina

Mediante el modelo integrado desarrollado en el estudio CORMAGDALENA-UNAL (2007a) es posible calcular, para el periodo de simulación, la longitud de la cuña salina desarrollada como variable de estado. La longitud de la cuña salina totalmente desarrollada depende de la profundidad de flujo y del caudal. Para una profundidad dada, a menor caudal la cuña salina se extiende hacia aguas arriba. Por esta razón se esperan diferencias en el efecto que las alternativas de manejo hidrosedimentológico pueden generar sobre la intrusión de la cuña salina a lo largo del Canal del Dique y los caños Correa, Matunilla y Lequerica.

En la Tabla 3-13 se presenta el valor de excedencia del 50% de la longitud de la cuña salina por los canales para el periodo de simulación 1988 – 1991. A su vez, en la Tabla 3-13 se presenta la máxima longitud de la cuña salina registrada en el mismo periodo de análisis. Los resultados demuestran claramente que la longitud de la cuña salina para los caudales medios en las alternativas con angostamientos (alternativas 3, 4 y 6), aumenta con respecto a las condiciones actuales por la reducción del caudal. Para las condiciones 2 y 4 la longitud de la cuña salina aumenta libremente hasta el punto donde se encuentra la compuerta-esclusa en el RK104, desde Pasacaballos por el Canal del Dique y por el caño Lequerica.

En la condición de caudales bajos para la alternativa 5, la cuña salina no alcanza a avanzar totalmente por el caño Lequerica. Sin embargo, nótese que en el caño Matunilla se reduce la intrusión salina en las alternativas 2, 4, 5 y 6 por la mayor derivación de caudal que se genera por efecto de las esclusas-compuertas. Debe tenerse en cuenta que los caudales mínimos, en cada una de las bocas de los caños para el periodo de simulación son mayores a 35 m³/s con excepción del caño Lequerica donde se tienen caudales de 10 m³/s y 6 m³/s en la condición actual y alternativa 3 respectivamente.

Tabla 3-12: Valor de excedencia del 50% de la Longitud de intrusión de la cuña salina

(m)

	Canal Dique Pasacaballos	Lequerica	Matunilla	Correa
Cond. Act.	529	3393	2719	229.2
Alternativa 2	11000	4000	54.4	177
Alternativa 3	1366	3960	3200	357.4
Alternativa 4	11000	4000	127.6	368.1
Alternativa 5	6000	184.2	185.8	332
Alternativa 6	6000	344.7	327.5	525.2

Tabla 3-13: Máxima longitud de la cuña salina

(m)

	Canal Dique	Lequerica	Matunilla	Correa
Cond. Act.	14270	4000	7000	1173
Alternativa 2	11000	4000	381.8	2092
Alternativa 3	26930	4000	7000	1770
Alternativa 4	11000	4000	2671	5507
Alternativa 5	6000	2832	2469	5329
Alternativa 6	6000	4000	3646	6375

En las Figura 3-19, Figura 3-20, Figura 3-21 y Figura 3-22 se presentan los valores de longitud en kilómetros, de la cuña salina totalmente desarrollada, por cada canal, para todas las alternativas modeladas. Nótese, en las Figura 3-19 y Figura 3-20, que se interrumpe el avance de la cuña salina por los caños Lequerica y Matunilla cuando se alcanza la conexión con el Canal del Dique a los 4 y 7 kilómetros respectivamente, y en la Figura 3-19, que para

las condiciones 2, 4 y 5, 6 ocurre la salinización del sistema hasta los 11 y 6 kilómetros dependiendo de la localización de la compuerta-esclusa respectivamente.

Figura 3-19: Longitud de la cuña salina desarrollada por el Canal del Dique

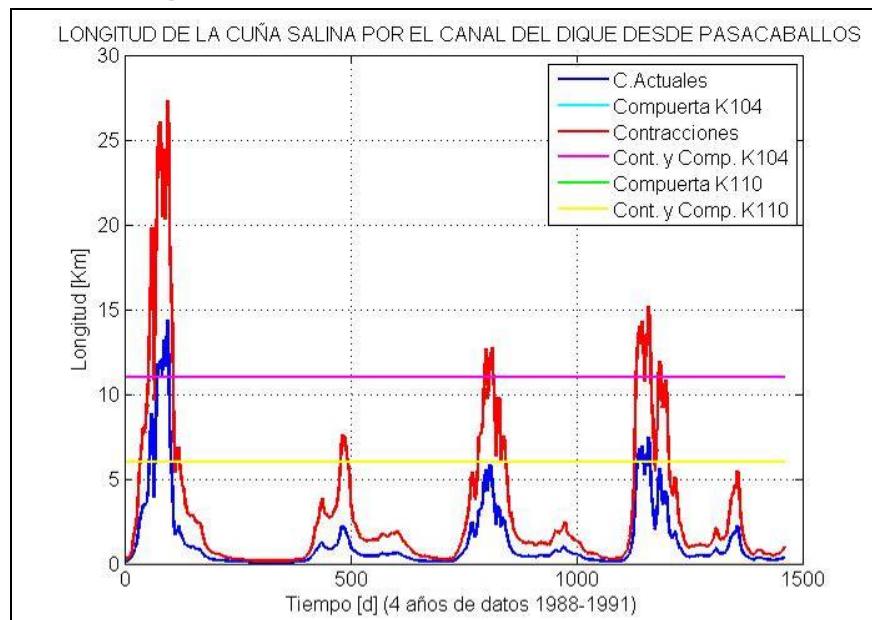


Figura 3-20: Longitud de la cuña salina desarrollada por el Caño Lequerica

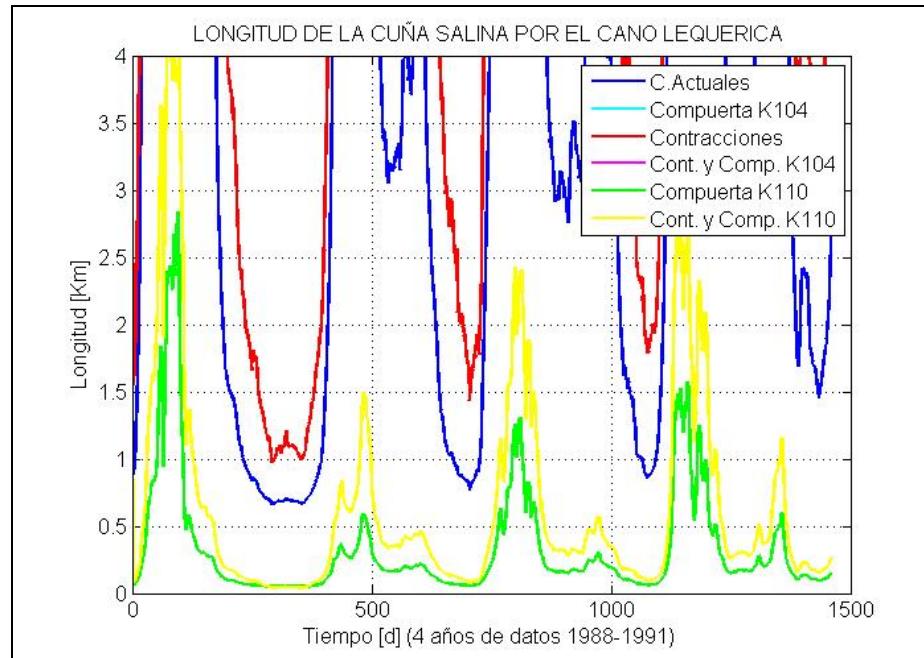


Figura 3-21: Longitud de la cuña salina desarrollada por el Caño Matunilla

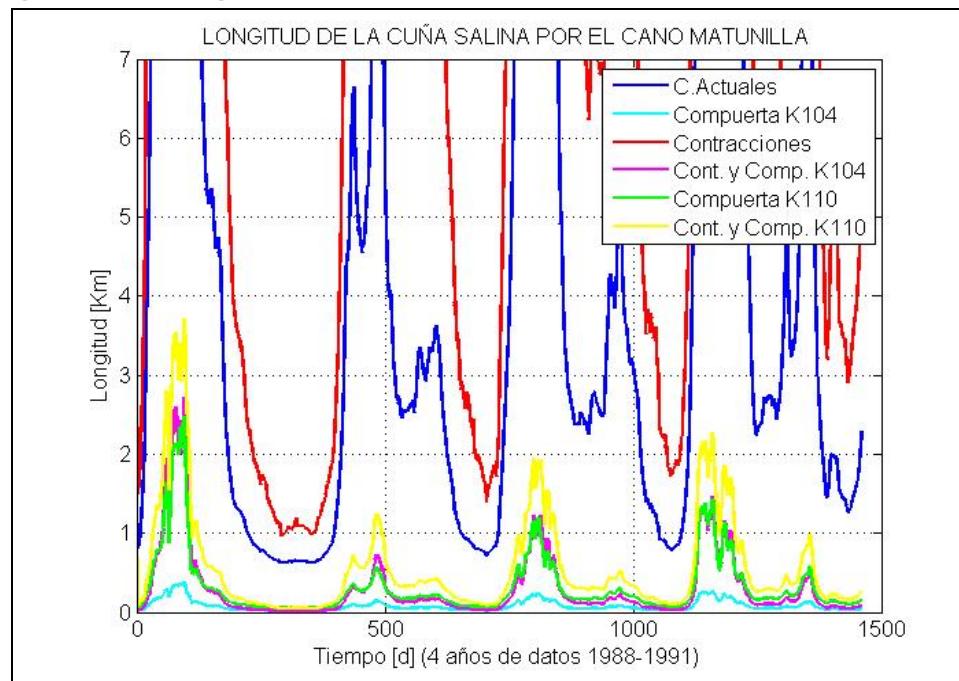
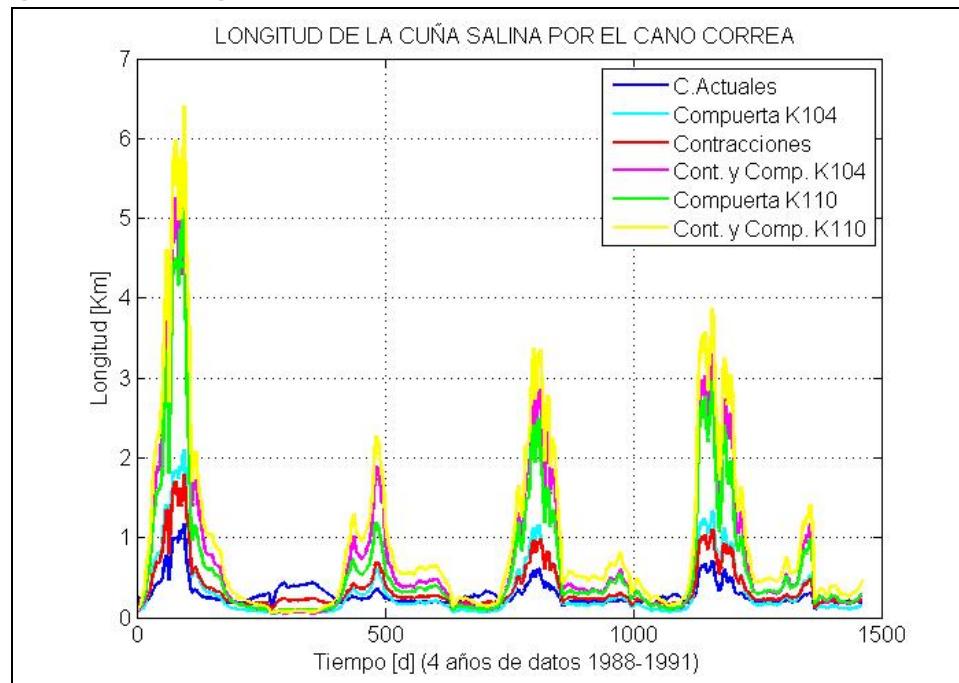


Figura 3-22: Longitud de la cuña salina desarrollada por el Caño Correa



3.3.8. Cuantificación del efecto de las alternativas en el estado limnológico de las ciénagas

Mediante el modelo matemático es posible calcular variables hidráulicas y de calidad del agua de las ciénagas. En el presente trabajo se ha repetido el ejercicio juicioso e interesante realizado en el proyecto CORMAGDALENA-UNAL (2007b) al desarrollarse un índice que agrupa dichas variables y permite juzgar el estado limnológico y, por lo tanto, la productividad, de las ciénagas de la ecorregión. De hecho, el índice de estado limnológico parcial (IELP, ver UNAL – CORMAGDALENA (2007d)) ha sido calculado a partir de las variables de la modelación de todo el sistema con el fin de cuantificar el posible impacto de las alternativas en el estado limnológico de cada ciénaga.

El índice se ha calculado en cada intervalo de tiempo a partir de las variables de estado del modelo: porcentaje de saturación de oxígeno disuelto, pH, nitratos, fósforo total, la relación nitratos/fosfatos, conductividad, la relación área/volumen de la ciénaga y concentración de clorofila-a.

A partir de las series de tiempo calculadas del IELP se ha estimado el valor del índice igualado o excedido el 50% del tiempo en cada ciénaga para cada alternativa. Los resultados muestran que en 9 de 11 ciénagas modeladas el $IELP_{50}$ resultante de los cuerpos de agua es mayor para la alternativa 4 de angostamientos y compuerta-esclusa en el RK 104. Estos resultados son de esperarse ya que para esta alternativa se mantiene e incluso aumenta ligeramente con respecto a las condiciones actuales el flujo de intercambio en las ciénagas y los desbordes de caudal lateral gracias a los angostamientos.

Debe recordarse que estas alternativas se han modelado con los parámetros de las interconexiones optimizados para la condición actual mejorada y por lo tanto la alternativa 4 de manejo hidrosedimentológico incluye la optimización de las ciénaga – canal a los valores de las interconexiones especificadas en la Tabla 3-3.

3.3.9. Mejor alternativa para la disminución de caudal

Considerando los factores hidráulicos, sedimentológicos, de calidad del agua, de desarrollo de la cuña salina y limnológicos en las ciénagas del sistema lagunar se considera que la mejor alternativa para la disminución del caudal y el aporte de sedimentos a la Bahía de Cartagena es la alternativa 4. Esta consiste en la optimización de los canales de interconexión ciénaga-canal, la construcción de angostamientos de la sección transversal en tres sectores del Canal, y la construcción de la compuerta-esclusa en el sector del Recreo en el kilómetro 104 del Canal.

El efecto combinado de las contracciones o angostamientos y de la esclusa – compuerta es reducir el caudal en el sistema en 27% con respecto a la condición actual de referencia manteniendo niveles de agua altos en las interconexiones ciénaga-canal sin que se afecten los intercambios de agua y de nutrientes necesarios para mantener adecuadas condiciones limnológicas en las ciénagas del sistema.

4. ASPECTOS HIDRÁULICOS Y DE NAVEGABILIDAD

Los angostamientos de la sección del Canal del Dique deben ser analizados desde el punto de vista de las condiciones hidráulicas que imponen, y de las condiciones especiales que imponen a la navegación en el Canal, con referencia a las condiciones actuales, de modo que los cambios producidos no repercutan negativamente sobre las condiciones presentes de navegabilidad. En el presente capítulo se discuten las modificaciones que pueden ocurrir, y los cambios sobre la condición actual.

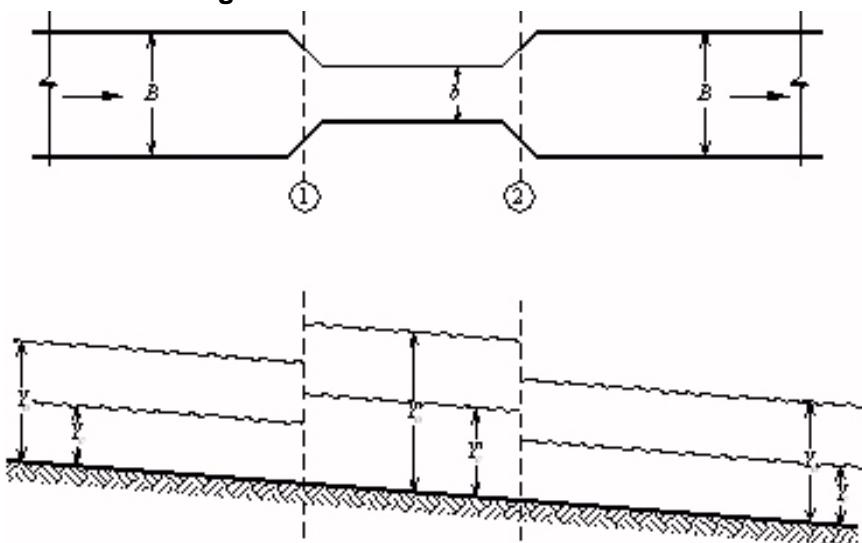
4.1. CONDICIONES HIDRÁULICAS

La hidráulica del flujo permanente a lo largo de un estrechamiento en un canal, puede estudiarse aplicando los conceptos de energía específica y perfiles de flujo en condiciones de flujo no-uniforme. La Figura 4-1, representa la vista en planta y perfil de un angostamiento en un canal rectangular; considerando por simplicidad, un canal muy ancho, con pendiente constante S_o , y un estrechamiento con transiciones suaves de manera que exista apenas una mínima pérdida de energía en los cambios de sección. Llamamos Y_o y Y_c las profundidades normal y crítica del canal original de ancho B , y Y'_o y Y'_c , las de la sección contraída de ancho b .

Para calcular los perfiles de flujo es necesario primero determinar los valores de la profundidad en los puntos de control, que estarán colocados en los cambios de sección que, podemos representar en las secciones 1 y 2. Para determinar las condiciones de profundidad en estas secciones es necesario considerar el contenido de energía del flujo de llegada al estrechamiento, para lo cual se dibujan las curvas de energía específica de los canales de ancho B y b , en la Figura 4-2. Las características generales de los perfiles a lo largo de la contracción, (Figura 4-1b), y de la curva de energía específica del canal contraído, se generan por el aumento del caudal por unidad de ancho en el sector angostado.

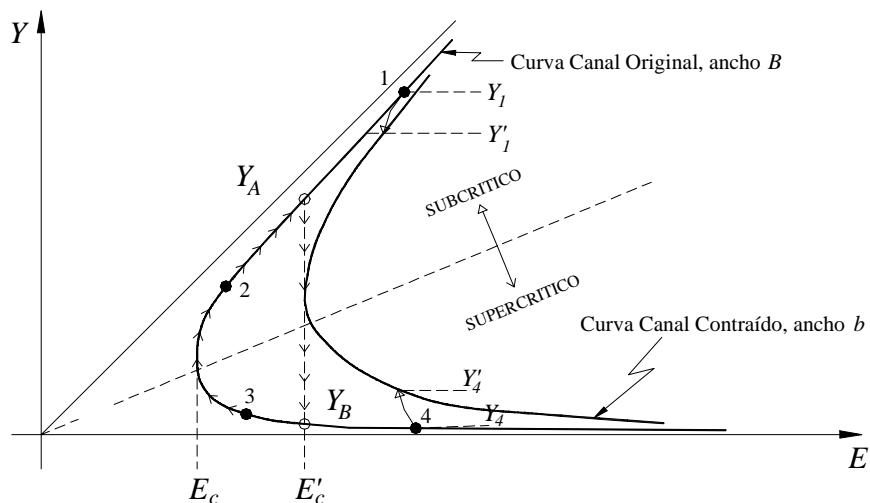
El resultado de la contracción sobre el flujo, dependerá totalmente de la cantidad de energía del flujo de llegada en el canal original; claramente existen cuatro posibilidades de flujo de acuerdo con la energía de llegada; estas cuatro condiciones están marcadas en la Figura 4-2 por los puntos 1, 2 ,3, y 4; los puntos 1 y 2 corresponden a la condición de flujo subcrítico en el canal de llegada, (caso del Canal del Dique); el punto 1 representa la condición cuando la energía de llegada E_l es muy superior a la energía mínima necesaria para fluir (con el caudal de llegada), en la sección contraída, E'_c ; bajo esta condición el flujo entrará a la sección contraída con una energía ligeramente menor debido a las perdidas en la contracción, E'_l , pero en todo caso, aun considerando que no hay perdidas, con una altura algo menor que Y_l ; $Y'_l < Y_l$.

Figura 4-1: Canal de estrechamiento



- a) Planta
- b) Perfil

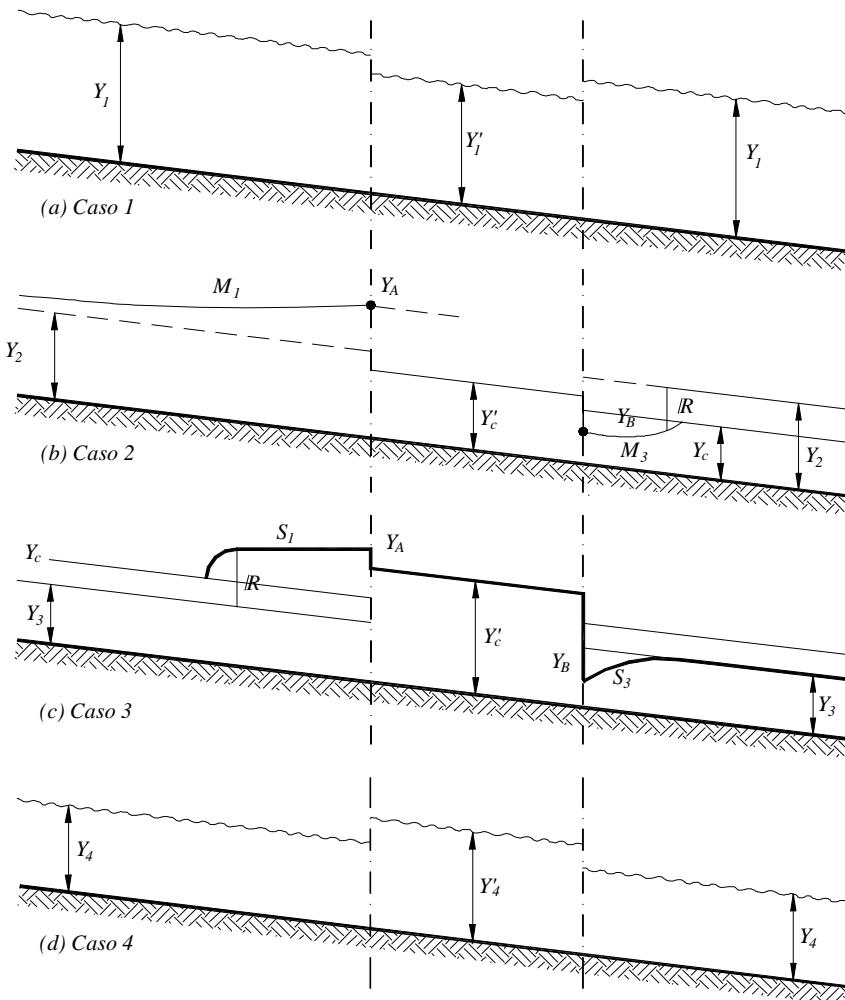
Figura 4-2: Curvas de Energía Específica para el Canal Original y el Canal Contraído



La condición 2 ocurriría si el flujo de llegada no tiene la energía necesaria para fluir, (con el caudal de llegada), en la sección contraída; en estas condiciones, un caudal inferior al caudal de llegada podrá pasar, (equivalente a una curva de energía intermedia), y el resto del agua se acumulará aguas arriba de la transición, con lo cual la altura del agua aumentará paulatinamente de Y_2 a Y_A , la altura a la cual la energía en el canal de llegada, E_A , iguala a la energía mínima para fluir en el canal contraído, E'_c ; el flujo se acelera entonces en la sección contraída y fluye cerca de la profundidad crítica Y'_c ; sin embargo, al salir de nuevo al canal original la aceleración que lleva le impide recuperar la profundidad Y_o , y en cambio se

acelera más, hasta Y_B , pasando a flujo supercrítico, con lo cual deberá ocurrir un resalto hidráulico aguas abajo cuando la fricción logre desacelerar el flujo nuevamente llevando a la condición de flujo subcrítico con profundidad normal Y_o . Esta condición implicaría una condición peligrosa en el canal aguas abajo de la contracción, que debe ser adecuadamente controlada, pero solo ocurre en el caso de angostamientos muy fuertes, que no están contemplados en la solución para el Canal del Dique, de hecho como se verá a continuación, los angostamientos en el presente caso son muy débiles y corresponden al caso 1 ya mencionado.

Figura 4-3: Casos de Flujo. Canal con estrechamiento



Las condiciones 3 y 4 son similares a las anteriores, pero ocurren únicamente para la condición de flujo supercrítico en el canal de llegada, es decir, que ocurrirían si el canal original tiene pendiente mayor que la pendiente crítica, lo cual no sucede en el Canal del Dique, razón por la cual no es necesario estudiar tampoco estos casos.

4.2. PROFUNDIDADES Y VELOCIDADES EN LOS ANGOSTAMIENTOS

Para un canal de sección trapezoidal, las condiciones son enteramente similares a las que se indican en las figuras anteriores, solo que resulta más difícil calcular el cambio en caudal por unidad de ancho; esto sin embargo no es necesario al nivel de determinar los cambios de nivel en el canal, para lo cual basta dibujar las curvas de energía específica como se ha indicado, para el canal original con ancho en la base de 60m y taludes 2:1, y el canal contraído con ancho en la base de 40m y taludes variables, o tomar los valores directamente del modelo matemático, lo cual se ha hecho en la Tabla 4-1 a la Tabla 4-3. Las tablas indican los valores de la profundidad media y de la velocidad de llegada a cada estrechamiento, (subíndice 1), en los diferentes sectores de ancho normal en el Canal del Dique, y las energías de los flujos de llegada a cada una de las contracciones consideradas, luego se dan los valores en el estrechamiento, (subíndice "e"), y la pérdida de energía Hf en las dos transiciones, que como se aprecia es bastante baja.

Tabla 4-1: Profundidades en el Primer Angostamiento

Caudal	Y1 (m)	V1 (m/seg)	E1 (m)	Hf (m)	Ye (m)	Ve (m/seg)
Mínimo	52.7	2.29	0.34	2.30	0.003	2.10
90%	229.2	4.63	0.63	4.65	0.065	4.35
50%	412.6	6.11	0.75	6.14	0.013	5.81
10%	819.7	8.66	1.02	8.86	0.030	8.17
Máximo	884.2	9.11	1.04	9.17	0.033	8.47
						2.18

Tabla 4-2: Profundidades en el Segundo Angostamiento

Caudal	Y1 (m)	V1 (m/seg)	E1 (m)	Hf (m)	Ye (m)	Ve (m/seg)
Mínimo	97.0	4.85	0.26	4.87	0.001	4.82
90%	212.0	6.20	0.51	6.23	0.002	6.0
50%	400.4	7.50	0.68	7.55	0.013	7.21
10%	758.2	9.00	0.95	9.10	0.018	8.65
Máximo	899.7	9.55	0.99	9.70	0.026	9.08
						2.00

Tabla 4-3: Profundidades en el Tercer Angostamiento

Caudal	Y1 (m)	V1 (m/seg)	E1 (m)	Hf (m)	Ye (m)	Ve (m/seg)
Mínimo	100.4	4.61	0.28	4.62	0.004	3.86
90%	217.6	5.71	0.47	5.72	0.009	4.64
50%	404.1	6.78	0.70	6.81	0.020	5.37
10%	654.1	8.05	1.06	8.11	0.030	6.01
Máximo	708.8	8.41	1.17	8.47	0.030	6.14
						2.21

Como se puede ver el cambio de velocidad del agua es marcado, pero no así el cambio de profundidad que es más reducido, siendo además la pérdida de energía en los cambios de

sección muy pequeña. Dado que la tendencia en los estrechamientos es a socavar la sección, será necesario dar a toda la zona del lecho un cubrimiento de material grueso, del mismo que se use para la conformación de los taludes, a fin de evitar que el aumento de área de la sección transversal compense la disminución del caudal por los estrechamientos.

4.3. CONDICIONES DE NAVEGABILIDAD EN LOS ANGOSTAMIENTOS

Para estudiar las condiciones de navegabilidad en los sectores angostos del canal, es necesario comparar la fuerza tractiva específica, T_s , necesaria para impulsar las embarcaciones en esos sectores y compararla con la que se requiere en la actualidad. Al realizar esta comparación, es necesario tener en cuenta que si bien los sectores angostados tendrán velocidades superiores hasta en un 100% a las de los sectores "normales", la fuerza tractiva necesaria disminuirá siempre en los trayectos hacia aguas abajo, y en todo el recorrido "normal" del Canal, en la dirección aguas arriba, debido a la reducción de la velocidad del agua, que se logra por la disminución general del caudal del canal en todo tiempo, gracias a los angostamientos; esta reducción es muy substancial y alcanza el 27% en el caso de caudales máximos y una cifra mayor, pero muy similar para los caudales medios y bajos.

La fuerza tractiva específica necesaria para impulsar las embarcaciones es una magnitud adimensional, similar en todo a la pendiente del Canal, y por lo tanto proporcional al cuadrado de la velocidad de la maquina con respecto al agua, de modo que basta con estimar los aumentos o disminuciones de dicha velocidad con respecto a la que existía antes de realizar los angostamientos. Esta comparación se realiza para el caso de los caudales máximos en cada angostamiento, en las Figura 4-4 a Figura 4-9.

Los valores de T_s se calculan por la fórmula de Langbein:

$$T_s = \frac{550 \cdot HP}{2240 \cdot V_{d(\text{pie/ seg})} \cdot \text{Desplazamiento}_{(\text{tons})}} \quad \text{Ecuación 4-1}$$

Donde HP representa la potencia de la embarcación, Vd la velocidad del barco y D el desplazamiento. Los gráficos muestran la mínima fuerza tractiva específica requerida para vencer la corriente en un río con velocidad y profundidad conocida, (líneas en negro). De acuerdo con Langbein, las embarcaciones comerciales típicas no navegan adecuadamente en ríos con T_s crítico mayor de 0.002, de modo que los valores a la derecha de esa curva corresponden a corrientes no-navegables por embarcaciones fluviales comerciales típicas. Como se puede ver, el Canal del Dique permite ampliamente la navegación de estas embarcaciones contra la corriente, tanto para las secciones típicas de la condición actual, como para los estrechamientos de la alternativa 4 con taludes 1:1, sin cambios mayores de funcionamiento y sin pasar los límites conocidos para fluviales típicas.

Figura 4-4: Condiciones de navegación contra la corriente, Angostamiento 1

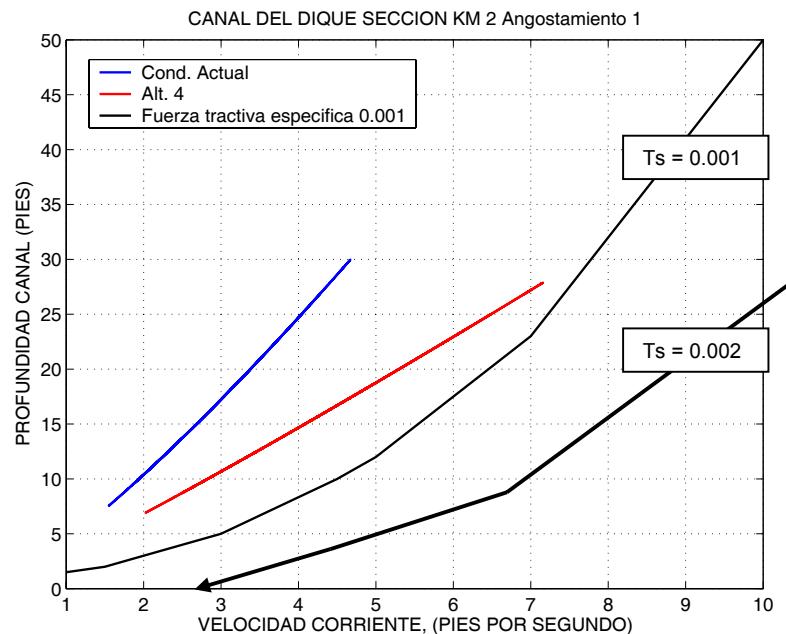


Figura 4-5 Condiciones de navegación contra la corriente, Sección intermedia 1-2

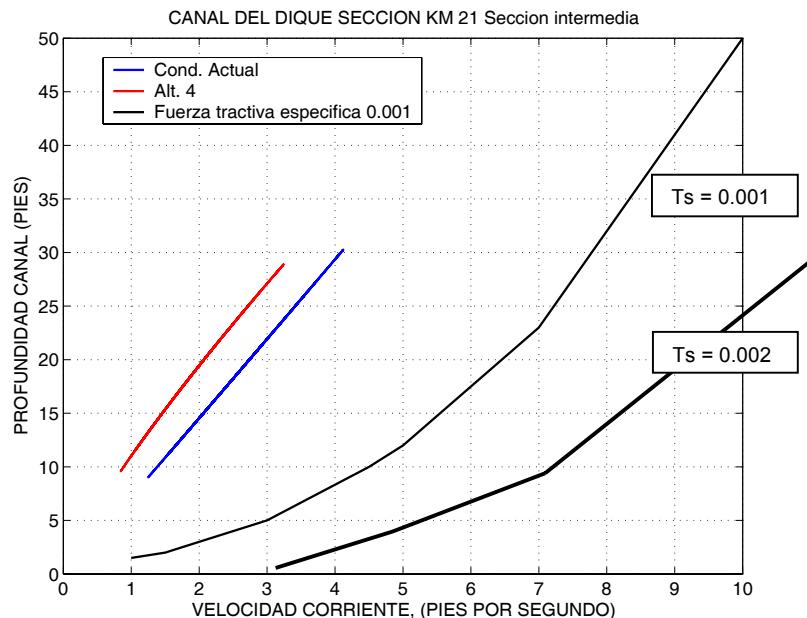


Figura 4-6: Condiciones de navegación contra la corriente, Angostamiento 2

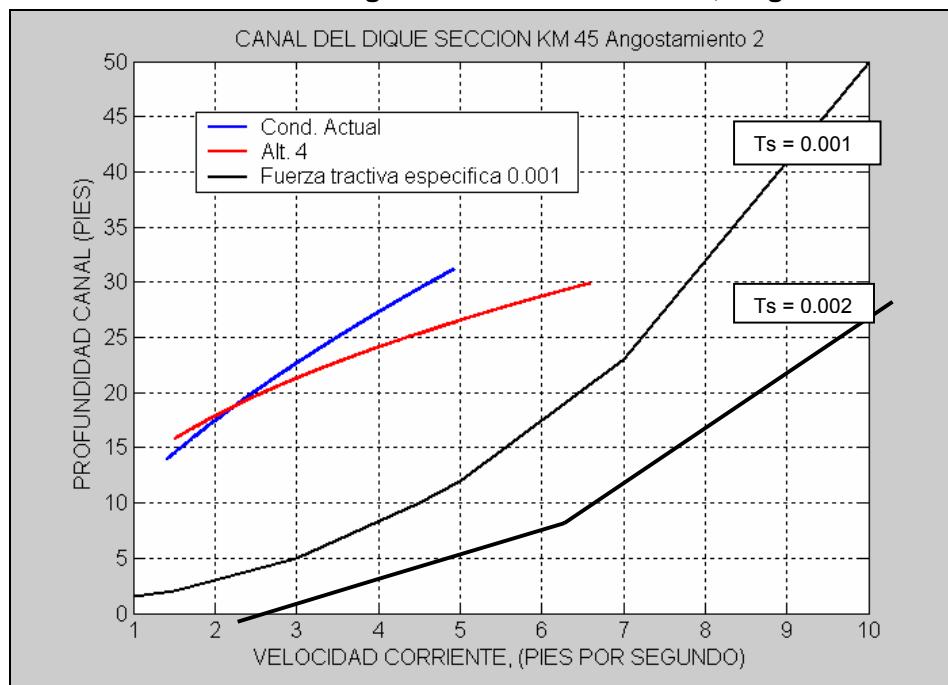


Figura 4-7: Condiciones de navegación contra la corriente, Sección intermedia 2-3

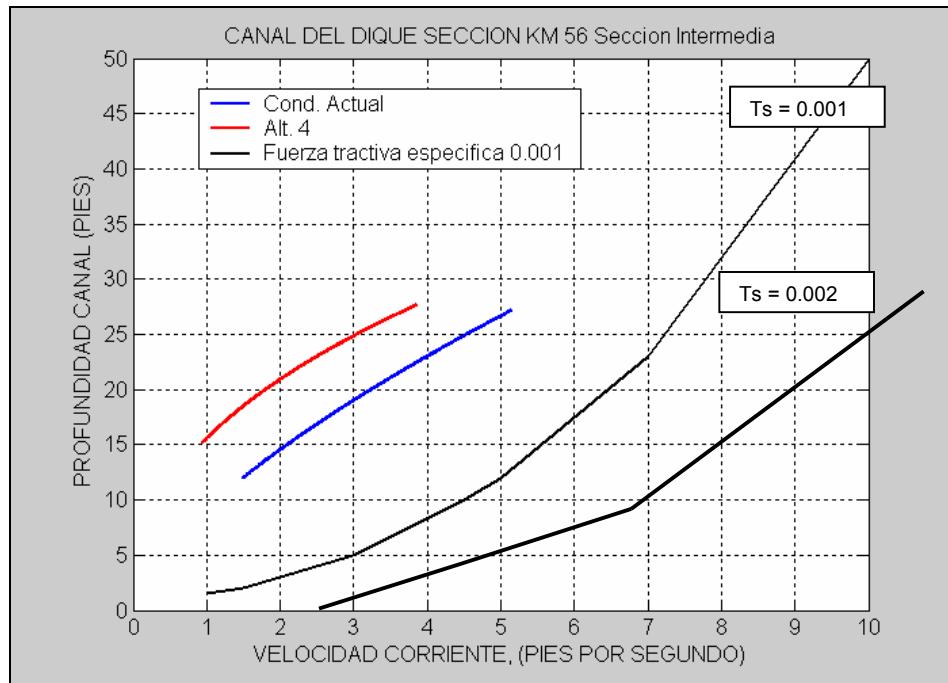


Figura 4-8: Condiciones de navegación contra la corriente, Angostamiento 3

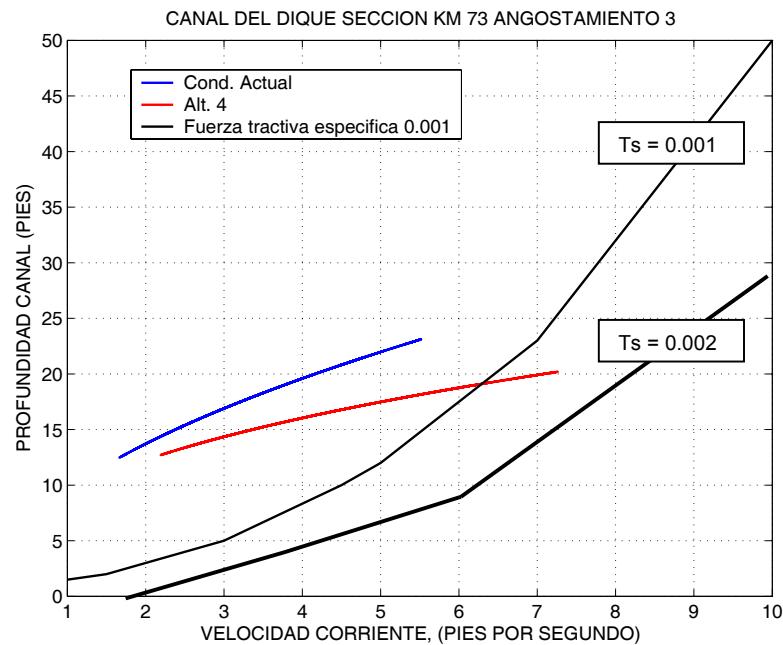
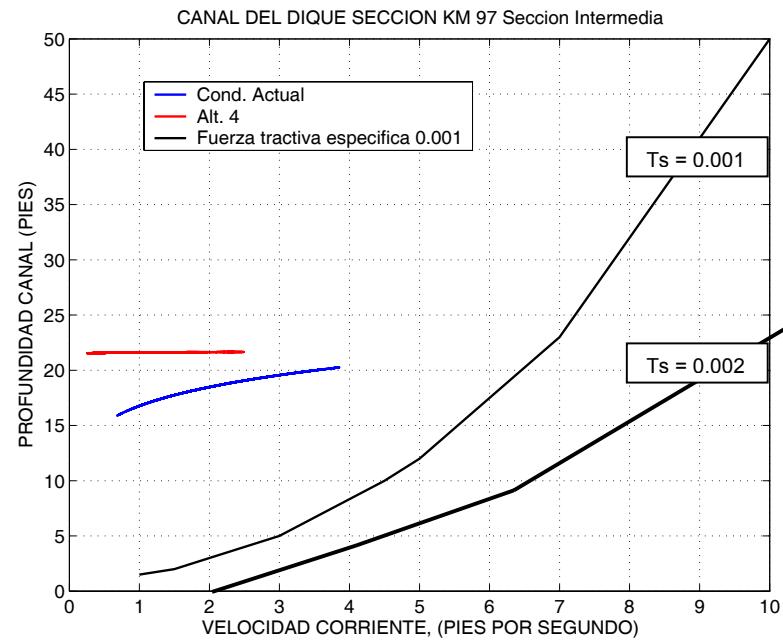


Figura 4-9: Condiciones de navegación contra la corriente, Sección Intermedia 3-E



5. MODELACIÓN DE LA ZONA COSTERA

El Canal del Dique es una obra fluvial construida por los españoles hace cerca de 350 años con el propósito de comunicar el río Magdalena con el puerto localizado en la Bahía de Cartagena. Esta vía de comunicación, que se mantiene operativa luego de tantos años y algunas modificaciones, deriva parte del caudal líquido y de los sedimentos transportados por el río Magdalena. El caudal líquido es un componente fundamental del balance hídrico de los cuerpos cenagosos que se localizan alrededor del canal. Parte del caudal líquido que desvía desde el Magdalena llega a la Bahía de Barbacoas a través de los caños Correa, Matunilla y Lequerica, y otra parte llega a la Bahía de Cartagena en su desembocadura final.

Se ha argumentado que los sedimentos que son transportados hasta la Bahía de Cartagena por la parte del caudal que llega hasta allí repercuten negativamente en la navegación y en las condiciones ambientales y paisajísticas de la bahía, por lo que se ha planteado la necesidad de reducir el aporte de sedimentos mediante la reducción del caudal líquido que le sirve como medio de transporte. En un estudio adelantado en la sede de Bogotá de la Universidad Nacional, se plantea que reducir dramáticamente el caudal líquido que fluye por el canal mediante obras hidráulicas ubicadas cerca a la entrada del canal en Calamar generaría graves consecuencias para los ecosistemas cenagosos vecinos al canal y para la fuente de agua para el acueducto de la ciudad de Cartagena. Por ello, la Universidad Nacional ha planteado la alternativa de reducir el caudal que llega a la Bahía de Cartagena mediante la construcción de obras hidráulicas localizadas hacia el final del canal que disminuyan el flujo hacia la Bahía de Cartagena generando una mayor descarga a través de los caños Correa, Matunilla y Lequerica.

Este aumento de la descarga al Mar Caribe y a la Bahía de Barbacoas estaría acompañado de un mayor aporte de sedimentos finos que podrían ser eventualmente transportados por las corrientes marinas hasta zonas de riqueza ecológica como las Islas del Rosario, con la posibilidad de generar grandes daños ambientales. Debido a este riesgo, se hace necesario adelantar un estudio de las condiciones hidrodinámicas y de transporte de sedimentos en la región del Mar Caribe comprendida entre las desembocaduras de los caños Correa, Matunilla y Lequerica y las Islas del Rosario, en donde se evalúen los patrones de circulación y de transporte de sedimentos. Para esta tarea se ha contactado al grupo de investigación Oceánicos de la sede de Medellín de la Universidad Nacional de Colombia.

5.1. ALCANCE Y OBJETIVOS

El alcance de esta parte del informe pretende ilustrar la metodología empleada y los resultados obtenidos en la estimación de los patrones de flujo en Bahía Barbacoas y sus posibles consecuencias en el transporte de sedimentos hacia las Islas del Rosario.

Se describen las fuentes de información utilizada, el procesamiento que se le ha dado a la información, algunos resultados más relevantes y se presenta el trabajo que propone por desarrollar para futuros estudios.

5.2. METODOLOGÍA

La estimación de la dinámica de los sedimentos en la Bahía de Barbacoas y sus posibles alteraciones debido al aumento de caudal líquido y sólido esperado al cerrar la boca del Canal del Dique en Pasacaballos, se está realizando mediante simulación numérica.

A pesar de que el propósito general del proyecto es caracterizar la dinámica del transporte de sedimentos aportados por los caños del canal del Dique en la Bahía de Barbacoas, y estimar que efectos tendría sobre esta dinámica el cierre de la boca del Canal del Dique en Pasacaballos, no se modelará explícitamente el transporte de sedimentos debido a que no se dispone de información directa ni secundaria sobre las características de los sedimentos como densidad, distribución de tamaños de grano y potencial de floculación. El presente estudio se limitará entonces a analizar las condiciones hidrodinámicas y sus posibles alteraciones generadas por el aumento en los aportes de caudal líquido. Se espera, sin embargo, que el análisis de los patrones de flujo proporcione una buena indicación de los patrones de transporte de los sedimentos finos, que viajan en suspensión y que son candidatos a ser transportados largas distancias, posiblemente hasta las Islas del Rosario.

Antes de ser utilizado para estimar condiciones hidrodinámicas, un modelo numérico debe ser calibrado y validado con información de campo que confirme que el modelo reproduce adecuadamente la condición física. Para ello, se requiere realizar campañas de campo en donde se hacen mediciones de las variables que caracterizan el forzamiento externo ejercido sobre el cuerpo de agua y de las variables que caracterizan la dinámica al interior del cuerpo de agua. Con el primer grupo de variables, del que hacen parte la velocidad y dirección del viento, niveles de marea en las fronteras abiertas del dominio, caudales afluentes, etc., son los forzadores del modelo; el segundo grupo de variables se usa para comparar los resultados obtenidos con el modelo y sirve como patrón de referencia para juzgar la calidad de los resultados del modelo.

En el proceso de calibración se ajustan algunos parámetros físicos y numéricos del modelo con el fin de mejorar los resultados del mismo de tal forma que reproduzcan adecuadamente las mediciones. Con el propósito de calibrar el modelo, se realizó una campaña de campo entre el 13 y el 25 de octubre del presente año. Se instalaron una estación climatológica en donde se registró información de vientos locales, humedad relativa y temperatura del aire cada media hora; y dos sensores de presión para registrar la variación del nivel de la superficie del agua cada 5 minutos, uno en la Bahía de Barbacoas (Estación LA PAZ) y otro en el otro lado de la Isla de Barú (Estación Cholón). Las variables al interior del cuerpo de agua fueron medidas en diferentes puntos de la bahía, a diferentes profundidades, y en diferentes instantes de tiempo con dos correntómetros acústicos que además de registrar magnitud y dirección de la corriente, permitían medir temperatura, salinidad y, en el caso de uno de ellos, turbidez.

Debido al corto plazo para la ejecución del proyecto, no se puede realizar una segunda campaña de campo que permitiera reunir información para validar el modelo. Por lo tanto, se omitirá esta etapa del proceso tradicional de simulación y se procederá a utilizar el modelo para simular escenarios una vez que haya sido calibrado.

Además de la información recolectada en campo, se ha reunido información secundaria como cartas náuticas para la definición de la batimetría, series históricas de caudal en los caños que vienen del Canal del Dique, series históricas de variables climatológicas (vientos, temperatura del aire, humedad relativa), imágenes de satélite donde puede apreciarse la configuración de la pluma que forman los afluentes en la bahía, entre otras cosas. La información secundaria sirvió para complementar la información recolectada durante la campaña de campo en la etapa de calibración del modelo y para describir el ciclo anual de los agentes externos que afectan la hidrodinámica de la bahía, de tal forma que se puedan detectar y definir los escenarios típicos que deben simularse.

Luego de algunas simulaciones preliminares se detectó que las fuerzas externas más importantes para la dinámica del sistema son los vientos y los caudales afluentes. Se detectó, además, que la variabilidad temporal en los caudales afluentes y la magnitud y dirección del viento no han estado históricamente en fase, por lo que hay condiciones críticas para el transporte de sedimentos hacia las Islas del Rosario que están determinados por altos caudales afluentes, así como otros escenarios críticos definidos por la magnitud del viento. Considerando además que un análisis de un par de situaciones críticas no da una idea real de las condiciones largo plazo, la selección de escenarios de modelación se basó un análisis de probabilidad de ocurrencia conjunta de eventos de viento y caudal.

Luego de simular los escenarios críticos basados en información histórica, se simularán situaciones de otra manera idénticas pero incrementando los caudales afluentes según las predicciones realizadas al considerar el cierre del Canal del Dique en Pasacaballos. La comparación entre las simulaciones con información histórica y las simulaciones con los caudales incrementados permitirá identificar los cambios generados por el cierre en Pasacaballos y permitirá evaluar si dichos cambios inducen cambios significativos en la cantidad de sedimentos que pueden ser transportados hacia las Islas del Rosario.

Para las simulaciones hidrodinámicas se utilizará el programa ELCOM, desarrollado en el Centre for Water Research de la Universidad de Australia Occidental. Este programa resuelve numéricamente las ecuaciones gobernantes de la hidrodinámica en tres dimensiones, de los flujos de calor entre el cuerpo de agua y la atmósfera, y del transporte de calor y de salinidad usando un esquema semi-implícito en diferencias finitas. El modelo ha sido ampliamente validado en múltiples aplicaciones en lagos, embalses, estuarios y zonas costeras.

Para la simulación numérica de alternativas, se escogió un dominio que cubre toda la Bahía de Barbacoas, las islas del Rosario, una región al Norte antes de la Isla de Tierra Bomba. Hacia el sur, el dominio cubre un tramo al sur de las bocas del Caño Correa. El transporte de sedimentos en suspensión en el dominio se simuló mediante el estudio de las rutas de circulación estimadas a partir de un trazador inerte, sin masa, que se suelta en las bocas de los caños y que por sus características físicas no se sedimenta. Esta condición es el límite al

que llegaría el sistema de Barbacoas y por lo tanto se espera que la situación real sea un poco mas favorable; sin embargo, el trazador permite el estudio comparativo de alternativas. Para un futuro proyecto se propone considerar los efectos sobre los resultados del modelo del considerar posibilidades de sedimentación del sedimento fino, condición que requiere de información de campo sobre las propiedades físicas del sedimento.

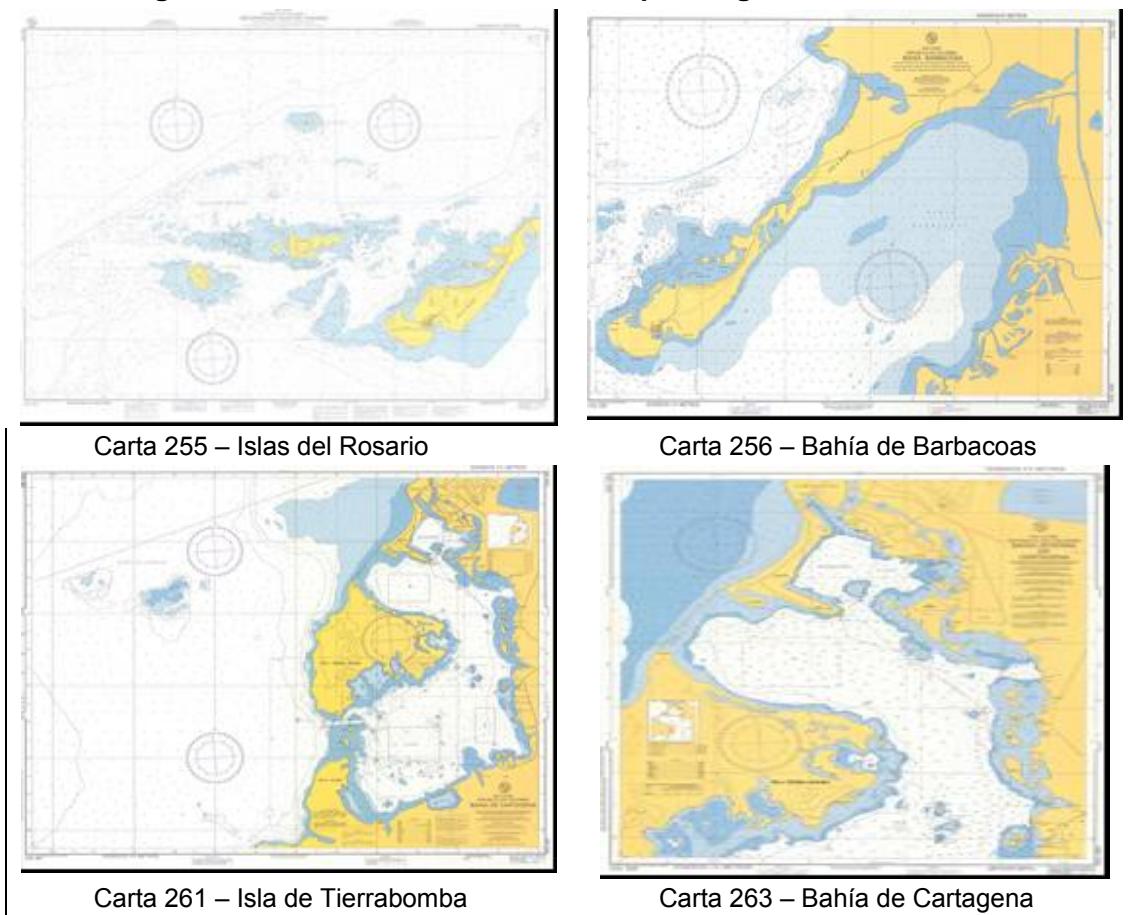
5.3. DATOS E INFORMACIÓN EMPLEADA

5.3.1. Información secundaria

5.3.1.1. Batimetrías

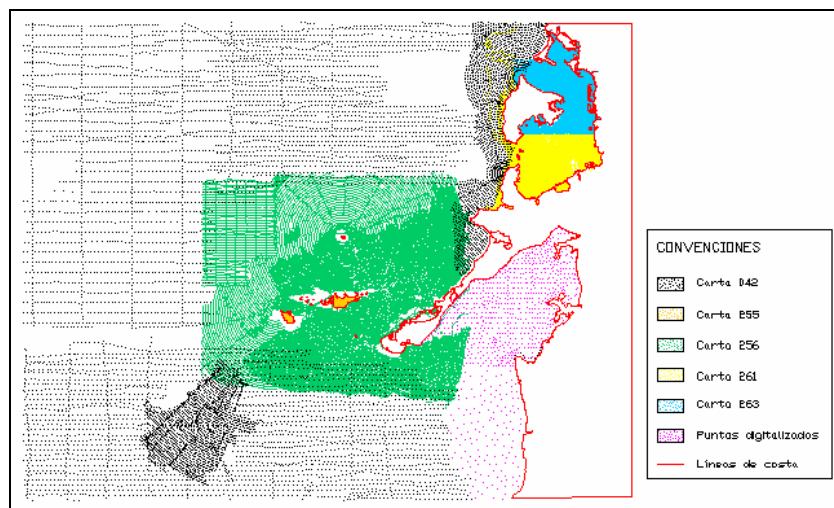
Para este estudio se tomaron las batimetrías del Atlas Cartográfico de los Océanos y Costas suministrado por la Dirección General Marítima (DIMAR), entre las que se encuentran las cartas 042, 255, 256, 261 y 263 que contienen datos de la zona de estudio, las cuales se muestran en la Figura 5-1.

Figura 5-1: Cartas náuticas utilizadas para regenerar la batimetría



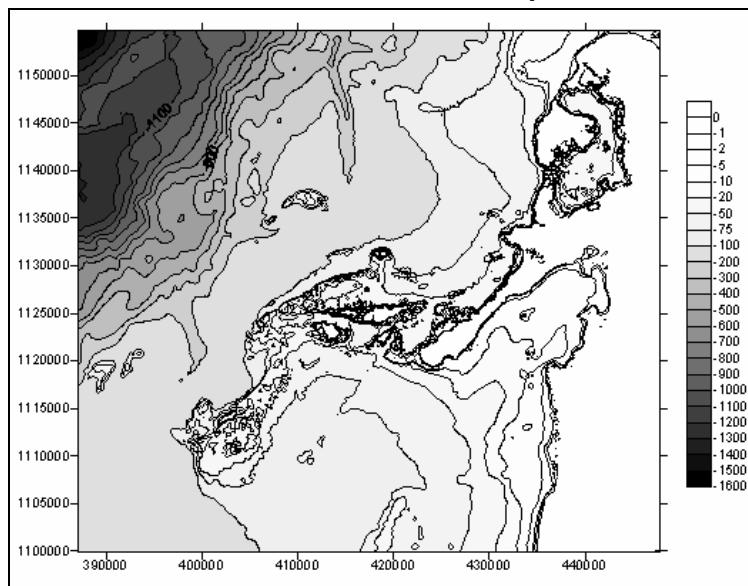
Se utilizó el Sistema de Modelado Costero – SMC desarrollado por la Universidad de Cantabria (UNICAN, 2002) y transferido a Colombia gracias al convenio de transferencia tecnológica entre la DIMAR y la UNICAN, dicho software permitió digitalizar algunos puntos de las cartas náuticas a fin de mejorar la distribución espacial de los datos de batimetrías disponibles y junto con las líneas de costa de islas y continente (ver Figura 5-2).

Figura 5-2: Distribución espacial de los datos utilizados para regenerar la batimetría de la zona de estudio



Ya teniendo la información georeferenciada y la profundidad en cada punto se realiza la interpolación de los datos para obtener la batimetría de la zona, (Figura 5-3).

Figura 5-3: Batimetría resultante de la interpolación de los datos



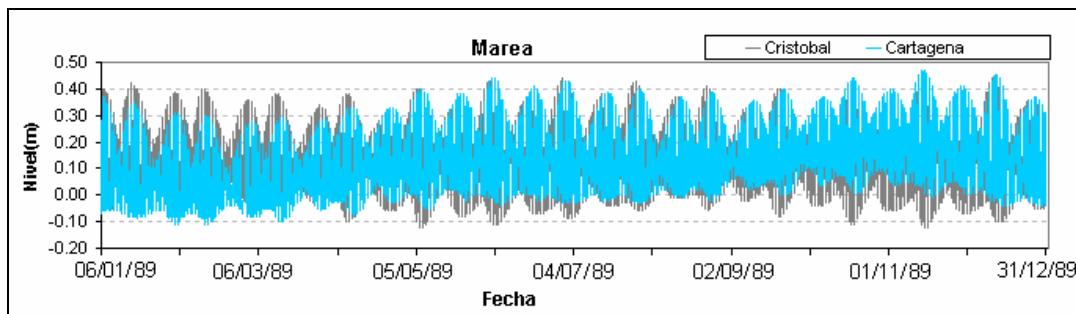
5.3.1.2. Marea Astronómica

Para suministrar los valores de condición de frontera representada por el nivel del mar necesario para la simulación de diferentes escenarios, se han procesado las predicciones presentadas por el sitio Web del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Marina en Francia (www.shom.fr). La página web ejecuta una aplicación que permite predecir la marea astronómica en los principales puertos del mundo con resolución horaria y una precisión de centímetros para las variaciones del nivel del mar y de minutos para la fase. La referencia utilizada para la predicción corresponde al nivel de marea astronómica más bajo en cada sitio; los cálculos se efectúan por medio de armónicos y estas series pueden ser descargadas para cualquier periodo de tiempo.

Se compararon las series de nivel del mar en Cartagena y en San Cristóbal (Panamá) en el periodo 1988 -1991 para conocer las diferencias de la marea entre ambos sitios, obtener una idea de los gradientes espaciales de nivel del mar que se presentan en la zona de estudio y evaluar la validez de utilizar la serie de marea en Cartagena directamente como condición de frontera para la modelación.

De acuerdo con las predicciones realizadas en Cartagena y en San Cristóbal con la aplicación antes mencionada, se observó un desfase de aproximadamente dos horas entre las series y una diferencia en la amplitud alrededor de los 10cm; siendo mayor en San Cristóbal; en ambos registros la amplitud media que se observó fue de 40cm. En la Figura 5-4 se aprecia el comportamiento de la serie de marea en estos sitios.

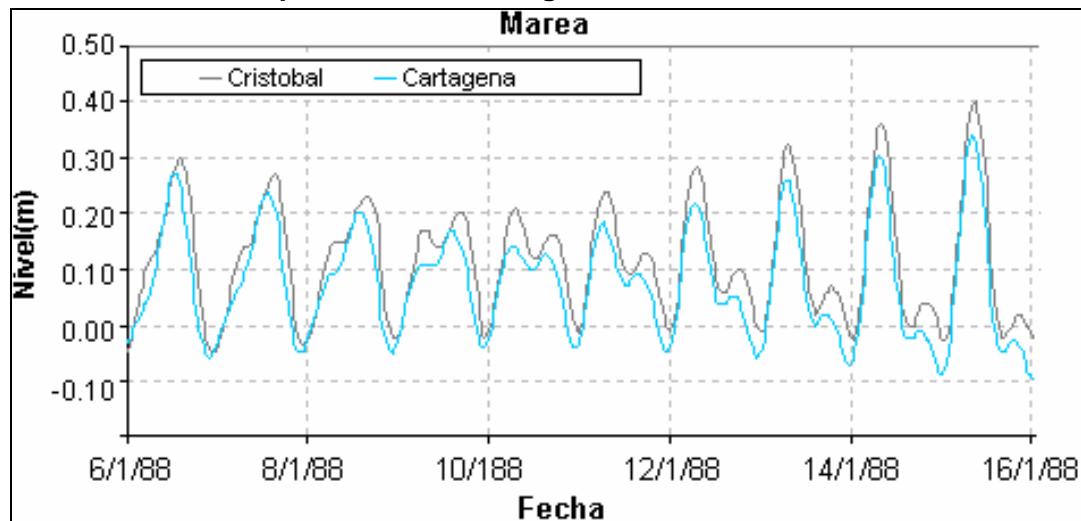
Figura 5-4: Predicciones de marea astronómica con los registros obtenidos del SHOM en los años 1988-1991



En la Figura 5-5 se muestra esta misma serie pero solo para tres días de registro, con el fin de visualizar mejor la variación de los niveles.

Estas series generadas a partir del SHOM se compararon con otras generadas por el software WX_Tide, de acceso libre, dando resultados muy similares entre sí. Por lo tanto, las series de marea a utilizar para el análisis de alternativas serán generadas con el software dada la facilidad de utilización. En el numeral 5.3.3.1 se presentan detalles sobre este tópico.

Figura 5-5: Predicciones de marea astronómica con los registros obtenidos del SHOM para tres días de registro en el año 1988



Se observa el desfase entre las series

5.3.1.3. Caudales

Los aportes de caudal líquido a través de los caños Matunilla, Lequerica y Correa, son agentes dinámicos importantes en la circulación en Bahía Barbacoas y son las fuentes principales de los sedimentos cuyo transporte se pretende evaluar.

Los caudales a través de estos caños han sido estimados en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, en el informe “Estudios e Investigaciones de las Obras de Restauración Ambiental y de Navegación del Canal del Dique” (Universidad Nacional, 2007). En este informe se explica en detalle el proceso de modelación física y numérica del Canal del Dique en el que se apoya dicha estimación. En particular, los caudales medios diarios fueron estimados para el periodo comprendido entre 1988 y 1991 debido a que cubre años con caudales cerca de los valores promedios, un año bastante húmedo, o año Niña, como el 1988-1989 y un año bastante seco, o año Niño, como el de 1991-1992.

Como resultado de la estimación de caudales realizada por la Universidad Nacional (2007), se pudo establecer qué porcentaje del caudal medio de la estación Incora del IDEAM ubicada sobre el río Magdalena, fluye por cada uno de los caños (Tabla 5-1).

De esta manera, se cuenta con los valores de caudal estimados en los 4 años mencionados y se pueden hacer una aproximación de los caudales a través de los caños en cualquier otra época en la que se cuente con mediciones de caudal en la estación Incora del IDEAM.

Tabla 5-1: Caudal medio por los caños en el periodo de simulación 1988-1991

Sitio de Interés	Q Promedio (m ³ /s)	% del Caudal Incora
Incora	508	100
Caño Correa	72	14
Caño Matunilla	105	21
Caño Lequerica	27	5
Pasacaballos	121	24

Fuente: Tomado de Universidad Nacional, 2007

La información de caudales durante la realización de la campaña de campo es un insumo importante para la calibración del modelo numérico con el que se simulará la circulación en la bahía. Durante la campaña de campo se tomaron niveles en cada una de las bocas de los caños, con los cuales se realizó un estimativo del caudal a través del modelo del canal del Dique por la sede de Bogotá para el periodo comprendido entre el 1 y el 31 de octubre. En la Tabla 5-2 se presentan los caudales estimados en las bocas de los caños.

Tabla 5-2: Caudales (m³/s) Promedio diario mensual durante la campaña de campo

	Correa		Matunilla		Lequerica		Pasacaballos	
	06:00 a.m.	06:00 p.m.	06:00 a.m.	06:00 p.m.	06:00 a.m.	06:00 p.m.	06:00 a.m.	06:00 p.m.
Octubre	157,28	155,88	223,28	221,40	53,70	53,25	237,49	235,66

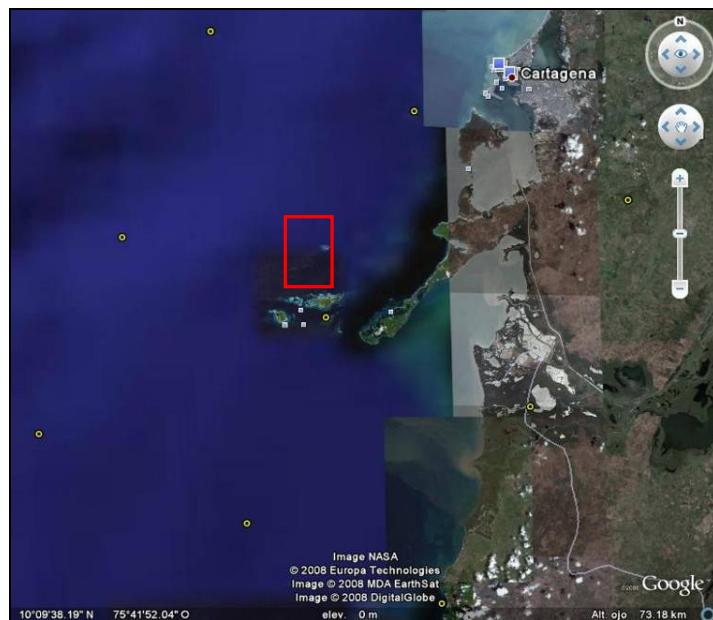
5.3.1.4. Climatología – vientos

Para las corridas preliminares se analizaron dos fuentes de información del campo de vientos: por un lado los valores medios mensuales de una estación del IDEAM ubicada en el aeropuerto de Cartagena, la cual abarca desde Enero de 1977 hasta Enero del 2000; y por otro lado las series de cuatro puntos de reanálisis del modelo de la NOAA (NCEP/NCAR), que abarcan desde 1947 hasta el 2007, las cuales tienen una resolución de 6 horas espaciadas cada 1.8°. Con respecto a los datos de reanálisis, se extrajeron diversas características como el ciclo diurno, las magnitudes y las direcciones.

Dado que no fue posible conseguir las series de tiempo del Aeropuerto de Cartagena, se recurrió a una tercera fuente de información que aportaba mejor resolución espacial y temporal: se utilizaron las series del reanálisis (NCEP/NCAR), que presentan una resolución de 3 horas con una resolución espacial de 0.25°, la cual tiene datos disponibles desde 1984 hasta 2000, y cuya ubicación se muestra en la Figura 5-6.

La serie de velocidad de viento de los datos de reanálisis para los cuatro años de interés (1988-1991) es la que se muestra en la Figura 5-7 y su correspondiente rosa de vientos se muestra en la Figura 5-8.

Figura 5-6: Ubicación de puntos de reanálisis NCEP/NCAR con respecto a la zona de estudio



El punto encerrado por el rectángulo es el utilizado para el desarrollo del presente trabajo (Isla del Rosario).

Figura 5-7: Velocidad del viento de los datos de reanálisis utilizados para la modelación

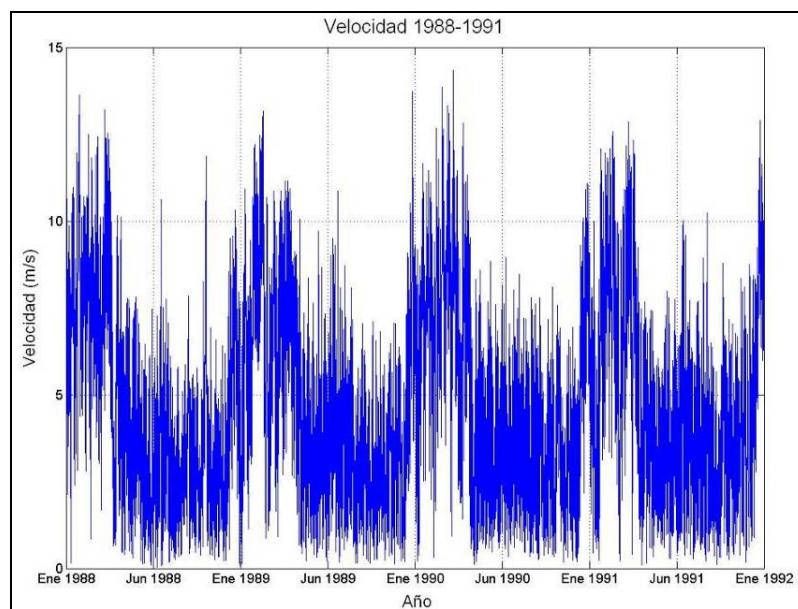
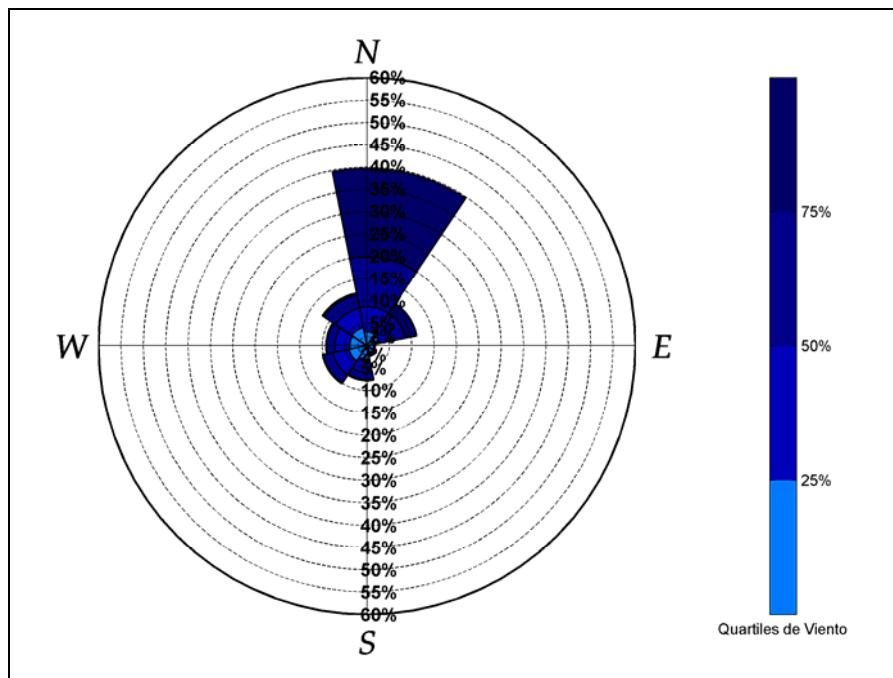


Figura 5-8: Rosa de los vientos de los datos de reanálisis utilizados para la modelación



5.3.2. Climatología – Otras variables

Dado que no fue posible conseguir, de parte de IDEAM, la información de algunas variables climatológicas, éstas se obtuvieron de diferentes procedimientos tal como se explica a continuación.

5.3.2.1. Radiación solar de onda larga

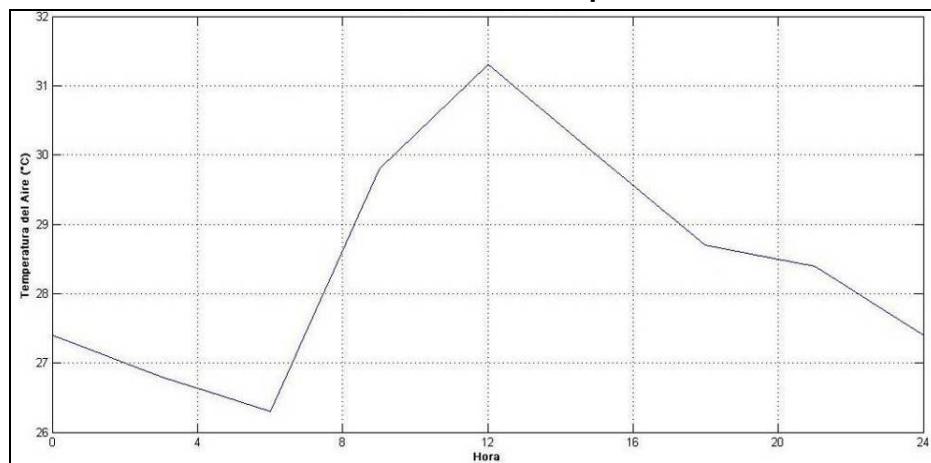
Debido a que no se hallaron registros de esta variable, se procedió a calcularla de manera analítica con las expresiones que proponen Martin y McCutcheon, 1999, las cuales permiten estimar la radiación de onda larga en la superficie de la tierra.

Siguiendo el procedimiento allí descrito, se obtiene la radiación solar de onda larga en función de la latitud, la longitud, el día, la hora; teniendo en cuenta algunos coeficientes que influyen en la interacción océano-atmósfera como el coeficiente de atenuación, la reflexión, la absorción, entre otros. En el numeral 5.3.3.2 se muestran los valores estimados para la campaña de campo y las series correspondientes a los casos de análisis de alternativas se muestran en el numeral 5.4.

5.3.2.2. Temperatura del aire

Esta variable se midió durante la campaña de campo. La serie completa de esta variable se presenta en el capítulo 0. Para el análisis de alternativas se utilizó la repetición de un ciclo diario promedio obtenido a partir de las mediciones, el cual se muestra en la Figura 5-9.

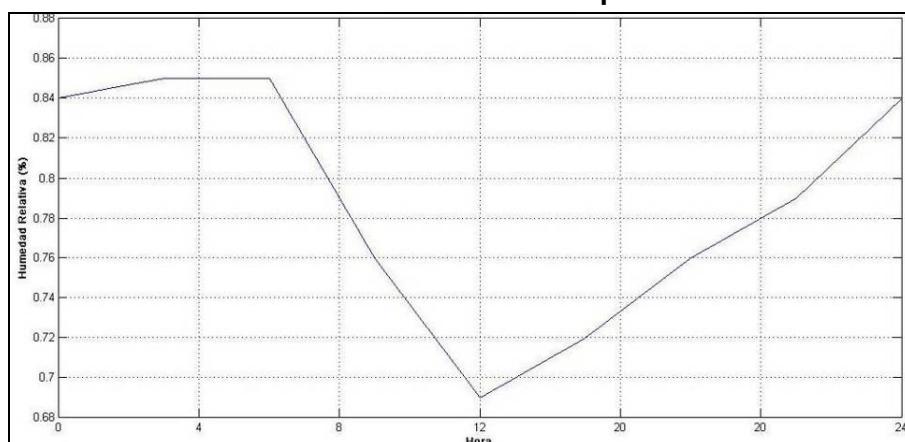
Figura 5-9: Ciclo diario promedio de Temperatura del aire calculado a partir de las mediciones de campo



5.3.2.3. Humedad relativa del aire

Esta variable se midió durante la campaña de medición. Para el análisis de alternativas se utilizó la repetición de un ciclo diario promedio obtenido a partir de las mediciones, el cual se muestra en la Figura 5-10.

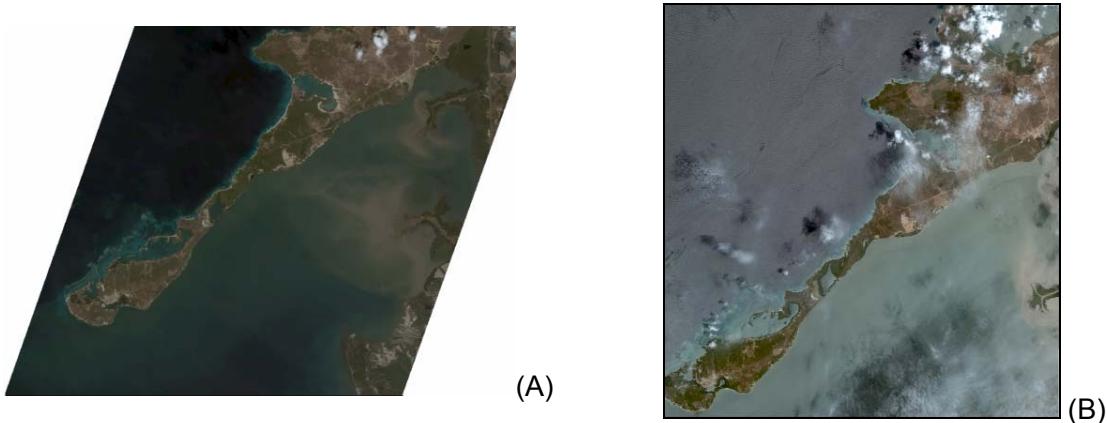
Figura 5-10: Ciclo diario promedio de Humedad Relativa del aire calculado a partir de las mediciones de campo



5.3.2.4. Imágenes satelitales y aéreas

Algunas fotos satelitales (ver por ejemplo Figura 5-11) de la zona fueron adquiridas gratuitamente de la compañía Digital Globe, en su máxima resolución formato png, con una cobertura de nubes menor del 20%.

Figura 5-11: Imágenes Landsat de la zona de estudio. (A):17de abril de 2006



Se observan las bocas Lequerica (superior) y Matunilla (inferior), (B): 14 de abril de 2008.
Se observan las plumas de las bocas Lequerica y Matunilla

La foto A fue adquirida en el mismo mes que la foto B, solo que esta última fue dos años después, se puede observar una tendencia diferente en la dirección de las plumas, en A se dirigen hacia el Suroeste, lo que implica una dirección en los vientos desde el Noreste, mientras que en B las plumas se dirigen hacia el Norte, por tanto, vientos desde el Sur.

Para el proyecto se adquirieron seis fotos aéreas de la zona, tomadas en las siguientes fechas:

- 14 de Marzo de 2005
- 17 de Abril de 2006
- 1 de Abril de 2002
- 14 de Abril de 2008
- 2 de Mayo de 2002
- 3 de Julio de 2006

5.3.3. Información de campo

Con el propósito de calibrar el modelo, se realizó una campaña de campo entre el 13 y el 25 de octubre del presente año donde se midieron una serie de parámetros físicos del agua (temperatura, salinidad, turbidez, velocidad) en diferentes estaciones de la bahía, niveles del

agua en dos estaciones, así como parámetros climáticos como velocidad del viento en tierra, temperatura del aire, etc. A continuación se hace una breve descripción de ellas.

5.3.3.1. Mareas

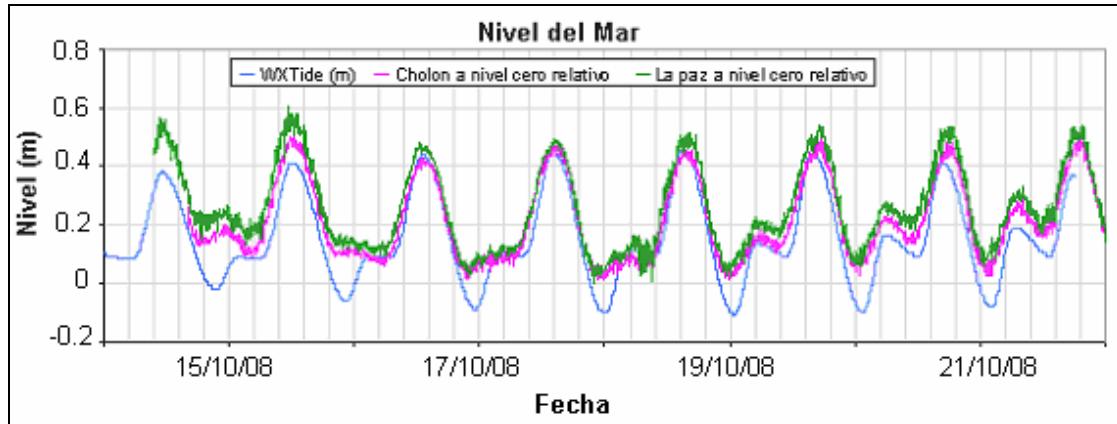
La estimación de la marea que se utilizará en el modelo matemático para la frontera abierta oceánica se hizo pensando en el período de calibración del modelo y en los períodos correspondientes a los diferentes escenarios que se estudiarán para analizar el patrón de circulación en la Bahía Barbacoas. Pasamos a describirlos a continuación.

Durante la campaña de campo se registraron variaciones del nivel del mar cada 5 minutos durante el período comprendido entre el 15 y el 22 de octubre. Estos registros se tomaron directamente con sensores de presión Global Water en la bahía de Cholón, sobre la costa de la Isla de Barú en el lado de mar abierto, y en el sector de La Paz dentro de la Bahía Barbacoas. El registro en la primera estación servirá para preparar las condiciones de frontera para el modelo numérico en su etapa de calibración, mientras que el segundo registro servirá como punto de comparación para evaluar los resultados del modelo.

En la **!Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los registros medidos del nivel del agua en la estación de Cholón, en la estación de La Paz para el período que coincide con la campaña de campo (Octubre 15 a Octubre 22 de 2008) y graficadas cada una con relación a un nivel de referencia propio. De esta figura puede observarse que las señales de Cholón y La Paz están en fase y tienen la misma amplitud con algunas pequeñas diferencias, especialmente durante los dos primeros días de mediciones. El rango de la marea para este período en estas estaciones fluctúa entre 40 y 45 cm con una componente diurna muy clara y otra semi-diurna que se hace evidente al final del período de medición. La señal en la estación de La Paz, en general, está del orden de 5 cm por encima de la señal en Cholón.

En la **!Error! No se encuentra el origen de la referencia.** también se muestra la señal de marea generada mediante el software WX_tide que genera series sintéticas de marea en cualquier punto del mar Caribe con base en un análisis de armónicos astronómicos entre los años 1970 y 2037. La correspondencia entre la señales es muy buena, aunque se muestra un desfase de la serie sintética de unas dos horas y unos valores de niveles mínimos menores que las mediciones, diferencia que se explican por efectos meteorológicos (vientos). En el numeral de análisis de alternativas se amplía un poco este punto.

Figura 5-12: Variación del nivel del mar en el periodo 15-17 de octubre de 2008



5.3.3.2. Climatología

Durante esta campaña se instaló una estación climatológica en donde se registró la información de vientos locales, humedad relativa, temperatura del aire y presión atmosférica cada media hora. En la Figura 5-13 a Figura 5-16 se presentan las series de tiempo medidas en campo de cada una de estas variables. Estos valores serán utilizados durante la calibración del modelo numérico.

Figura 5-13: Velocidad de vientos medida durante la campaña de campo

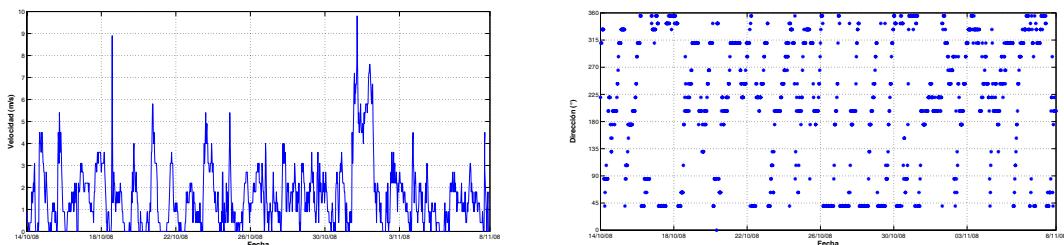


Figura 5-14: Humedad relativa del aire medida durante la campaña de campo

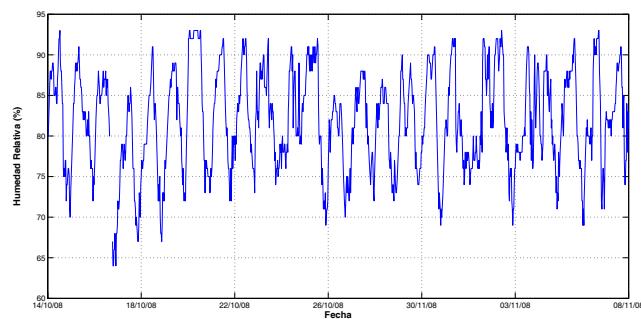


Figura 5-15: Temperatura medida del aire durante la campaña de campo

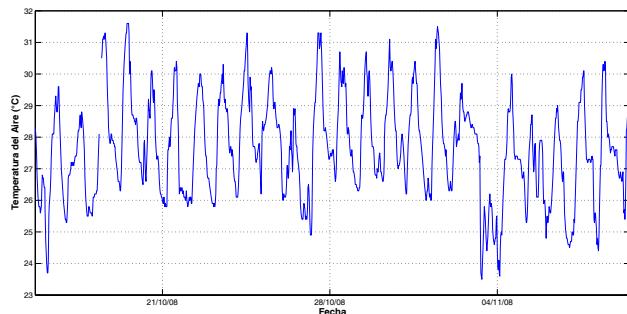
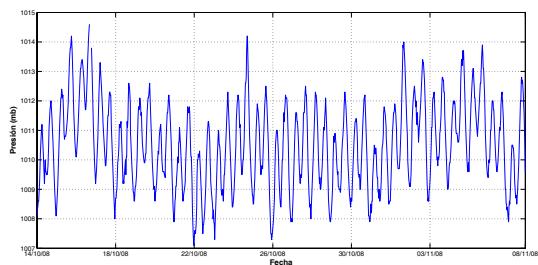


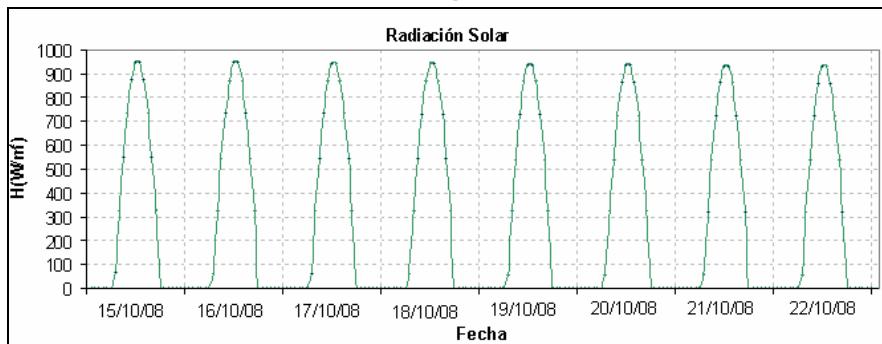
Figura 5-16: Presión Atmosférica medida durante la campaña de campo



El efecto de la radiación solar sobre la superficie del mar es un incremento en su temperatura superficial, generando unas condiciones especiales sobre esta masa de agua que influyen en gran medida en los resultados de la modelación.

Debido a que no se hallaron registros de esta variable, se procedió a calcularla de manera analítica con las expresiones que proponen Martin y McCutcheon, 1999. Estos autores describen el procedimiento para estimar la radiación de onda larga en la superficie de la tierra. Siguiendo el procedimiento allí descrito, se obtiene la radiación en función de la latitud, la longitud, el día del año, y la hora. Para estos cálculos se tienen en cuenta algunos coeficientes que influyen en la interacción océano-atmósfera como el coeficiente de atenuación, la reflexión, la absorción, la cobertura de nubes, entre otros. La serie de tiempo calculadas mediante el procedimiento enunciado anteriormente se muestra en la Figura 5-17.

Figura 5-17: Radiación solar de Onda Larga medida durante la campaña de campo



Período comprendido entre el 14 de Octubre y el 8 de Noviembre de 2008

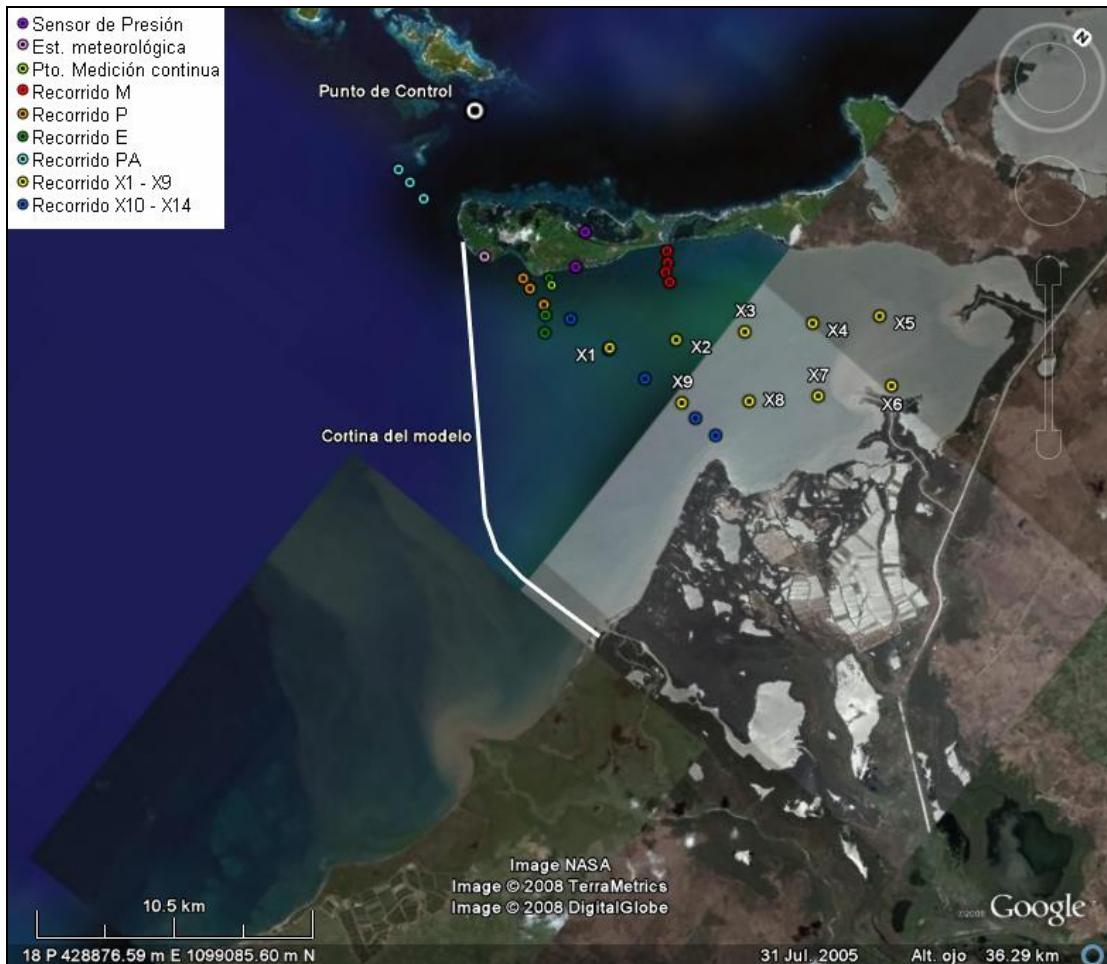
5.3.3.3. Datos oceanográficos

Las variables al interior del cuerpo de agua fueron medidas en diferentes puntos de la bahía, a diferentes profundidades, y en diferentes instantes de tiempo con dos correntómetros acústicos que además de registrar magnitud y dirección de la corriente, permitían medir temperatura, salinidad y, en el caso de uno de ellos, turbidez. Uno de los correntómetros se designó para tomar mediciones en un mismo punto de la bahía cada hora, 24 horas al día, durante cinco días seguidos a diferentes profundidades para obtener las variaciones diurnas de las variables medidas a lo largo de un perfil. El otro correntómetro se utilizó para determinar la variación espacial de estas mismas variables, para lo cual se levantaron perfiles a lo largo y ancho de la bahía tratando además de tomar perfiles en el mismo punto a diferentes horas del día. La Figura 5-18 muestra la ubicación de los instrumentos fijos y los lugares en donde se hicieron mediciones con los correntómetros.

Los perfiles medidos en campo servirán para calibrar el modelo. Sin embargo, su función principal es proporcionar información directa de las condiciones de circulación en la Bahía. La Figura 5-19 presenta, a manera de ejemplo, campos de isovalores de algunas variables sobre un corte vertical construido a partir de perfiles medidos en las estaciones M1, M2, M3 y M4 (puntos en rojo en la Figura 5-18).

La magnitud y dirección de la velocidad revela corrientes directamente; otras variables como la densidad y la turbidez, permiten identificar masas de agua con calidades y orígenes diferentes, lo que proporciona información clave sobre aspectos como la profundidad sobre la cual el viento distribuye momentum, el espesor de la capa de agua dulce y menos densa y su variabilidad espacial, y sobre la manera como la concentración de sedimentos suspendidos, asociados con la turbidez, varía espacialmente.

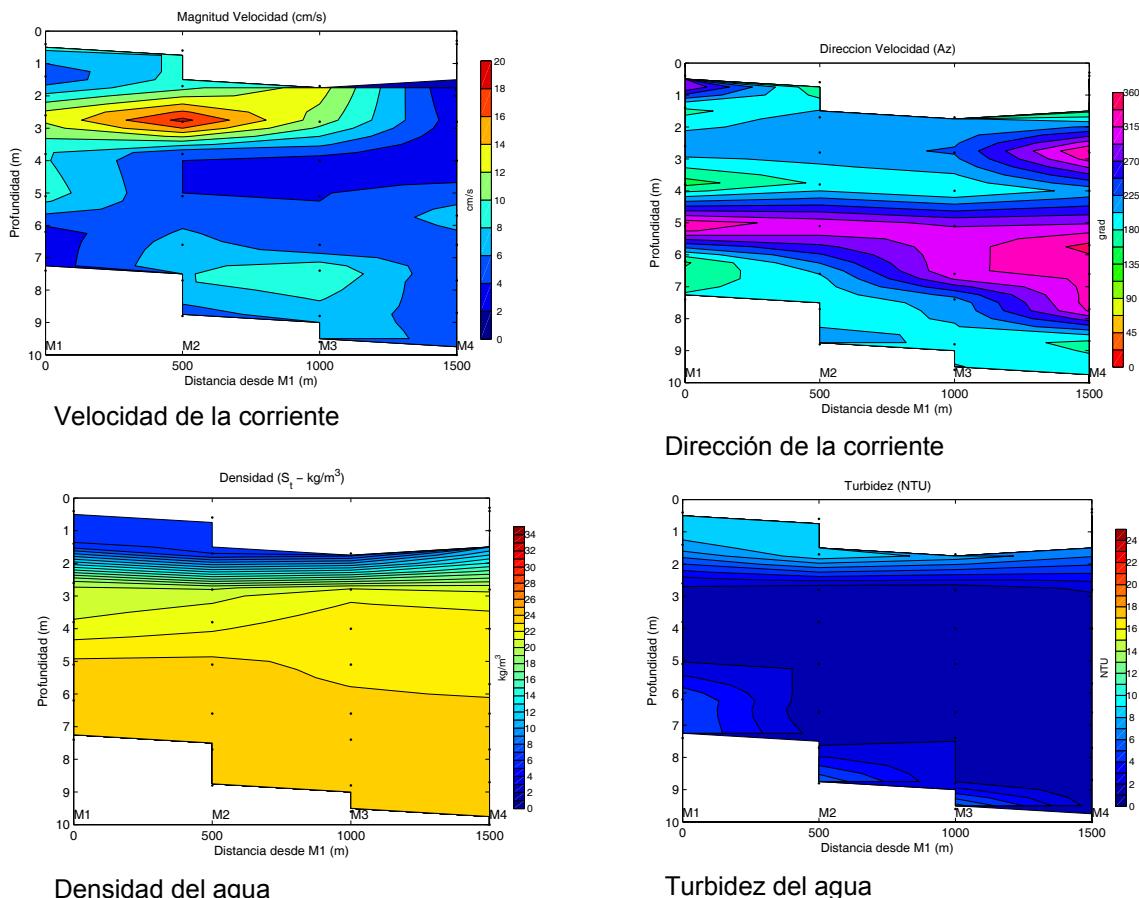
Figura 5-18: Ubicación de los equipos de medición y distribución espacial de los perfiles levantados durante la campaña de campo



Fuente: Imagen tomada de la versión libre de Google Earth.

A manera de ejemplo se muestran en la Figura 5-19 el comportamiento de las variables velocidad y dirección de la corriente, densidad y turbidez del agua a lo largo de una sección M1-M4 (ver localización en Figura 5-18). Se puede observar que la velocidad pico a lo largo de esta sección se encuentra en cercanías a la estación M2 y a una profundidad de 3 m, aprox. También se observa que a lo largo de esta sección se tiene un gradiente alto de densidad cercano a la superficie, detectándose las aguas dulces provenientes de los caños. La turbidez muestra un comportamiento parecido al de la densidad del agua, resultado que confirma la presencia de la cuña de agua dulce en esta sección.

Figura 5-19: Campos de isovalores sobre un corte vertical construido a partir de perfiles medidos en las estaciones M1, M2, M3 y M4



5.4. MODELACIÓN

A continuación se presentan detalles del proceso de simulación utilizado para el análisis de la dinámica de las corrientes y rutas de sedimentos en la Bahía Barbacoas y sus posibles impactos sobre las islas del Rosario. Se empieza con una descripción de la malla de cálculo utilizada en el estudio, luego se presentan la metodología y los resultados obtenidos en la etapa de calibración del modelo ELCOM y por último se presenta el análisis de alternativas.

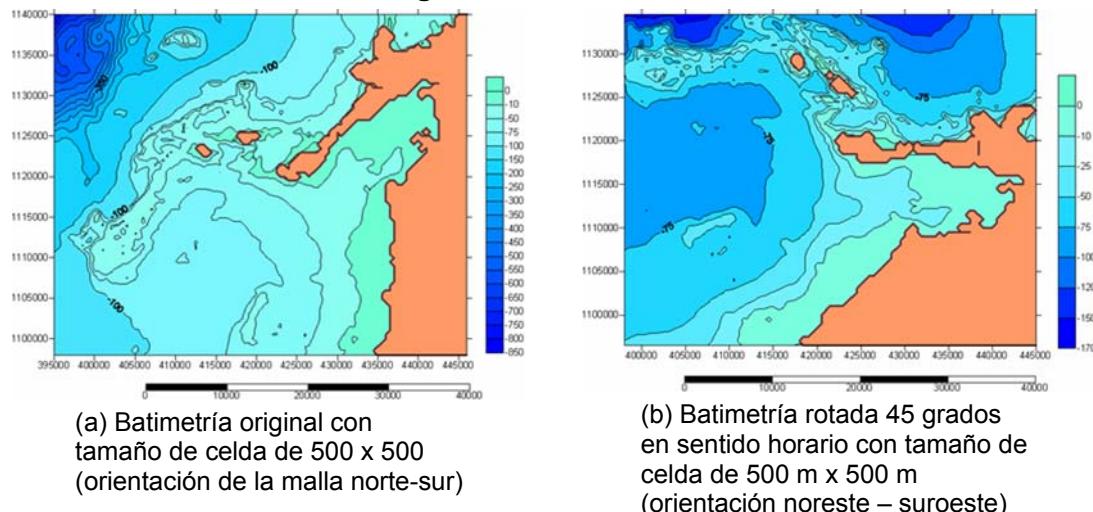
5.4.1. Malla seleccionada para la simulación

El modelo ELCOM, que se usará para realizar la simulación de la Bahía de Barbacoas, es un modelo en diferencias finitas que discretiza el espacio por medio de una malla estructurada de celdas rectangulares.

Dado que la isla de Barú tiene una orientación noreste – suroeste (Ver Figura 5-20a), al discretizar el espacio, los contornos no quedan bien definidos con una malla orientada en

sentido norte - sur debido a la geometría fuertemente escalonada que representaría a la isla de Barú por estar inclinada 45 grados con respecto a la malla.

Figura 5-20: Batimetrías



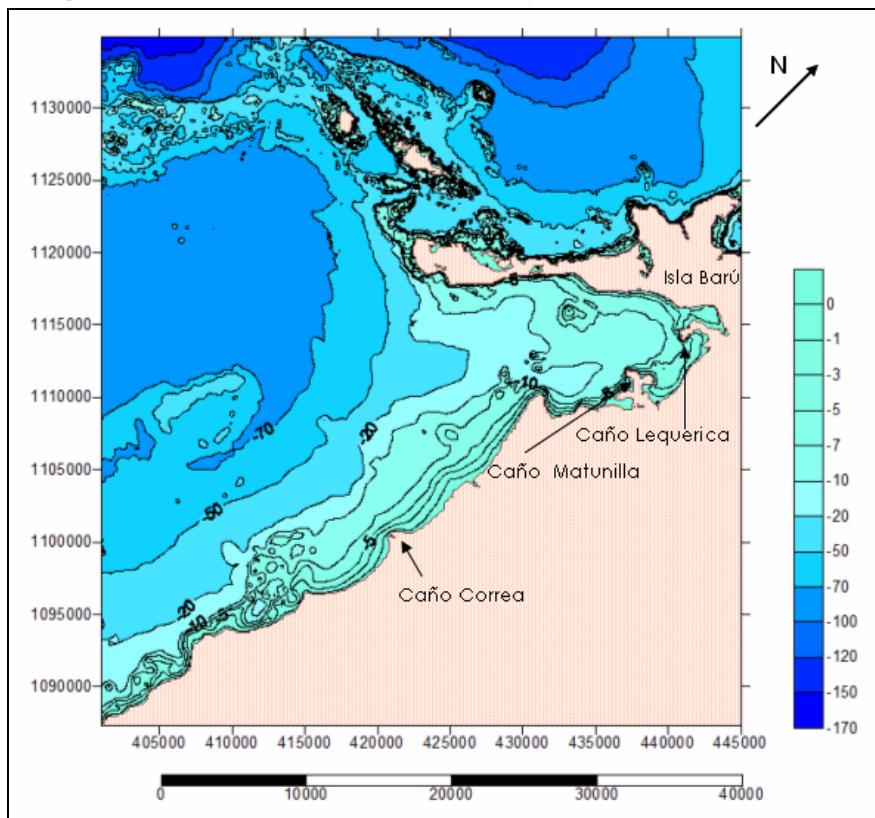
Por esta razón se decidió orientar esta malla gruesa, con tamaño de celda de 500 m x 500 m, en dirección noreste – suroeste (Figura 5-20b), para definir de manera más adecuada los contornos. Para el análisis de sensibilidad del tiempo de cálculo con la malla rotada y sin rotar, se corrió el modelo con ambas orientaciones de malla y con los mismos forzadores externos en ambos casos (los mismos caudales saliendo por las bocas, la misma dirección y magnitud del viento, la misma carrera de marea, etc). El resultado fue contundente. Mientras que con la malla orientada norte – sur, el tiempo de cálculo fue del orden de 7 horas, con la malla rotada este tiempo se redujo a poco mas de 4 horas, esto significa una reducción de tiempo de cálculo de más del 40%.

El dominio cubierto para la simulación definitiva y la orientación de la batimetría se muestra en la Figura 5-21. Allí se observa que además de la Bahía de Barbacoas como tal, se incluye también en el dominio de simulación, las Islas del Rosario y los bajos cercanos a estas, además del caño Correa, el cual, aunque esta fuera de la bahía, descarga un caudal sólido muy considerable (Ver Figura 3-15) el cual puede ser igual o más importante que los caudales de los caños Lequerica y Matunilla.

Dada la importancia de representar con el mayor detalle la hidrodinámica cerca de las bocas y al interior de la bahía, es necesaria una malla de cálculo lo suficientemente fina para obtener un buen detalle, sin embargo, mientras más fina sea la malla, mayor es el tiempo de cálculo. Es por esto que se tomó una malla variable que permitiera definir con buen detalle las zonas claves (bahía de Barbacoas e Islas del Rosario), pero que permita agilidad en los cálculos trabajando variaciones gruesas en las zonas menos relevantes como la mitad inferior del dominio de cálculo. La 22 muestra la variación espacial del tamaño de celda en direcciones X y Y: cerca de las bocas la malla está formada por celdas de 90 m en dirección

X y 200 m en dirección Y mientras que en la frontera abierta, afuera de la bahía, se definieron celdas de 530 m en dirección X y 550 m en dirección Y.

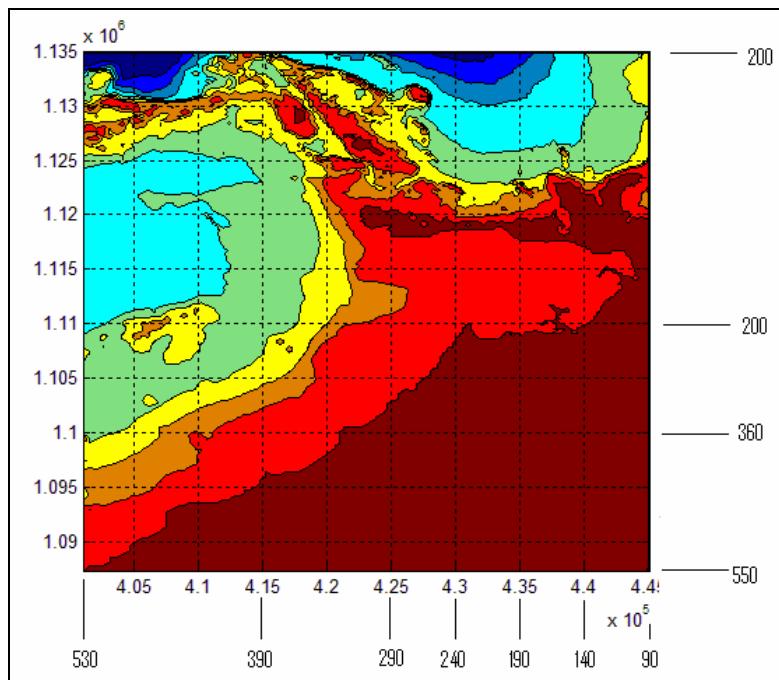
Figura 5-21: Dominio de simulación y orientación de la malla



Dado el carácter exploratorio de este estudio, y con el propósito de ahorrar tiempo de cálculo, se hizo una comparación de los resultados del modelo utilizando la malla gruesa con los de la malla variable. La comparación mostró que para la salinidad, en general, la malla variable presenta valores de salinidad en superficie mayores en un 10% que aquellos obtenidos con la malla gruesa. Sin embargo, con ambas se obtuvo prácticamente la misma localización de la haloclina en la vertical y en todo el dominio. Para efectos de interpretación de resultados en lo relacionado con corrientes y rutas de los trazadores, (sedimento en suspensión), consideramos que la resolución espacial obtenida con la malla gruesa es suficiente, mostrando las tendencias de una manera realista. Sin embargo, para las zonas cercanas a las bocas de Lequerica, Matunilla y Caño Correa, los resultados tienen menor precisión. De todas maneras, se recomienda realizar un estudio mas detallado sobre la malla de cálculo, localizando zonas de importancia para refinar los resultados.

Con respecto a la malla en la dirección vertical, se definieron 21 capas de altura variable, de 0,25 m cerca a la superficie y hasta 40 m en las zonas profundas. La malla fina cubre los primeros 3 m de profundidad, profundidad a la cual se pudo localizar la haloclina.

Figura 5-22: Variación espacial del tamaño del tamaño de celda para la discretización del dominio de cálculo



5.4.2. Calibración del modelo

Para calibrar el modelo ELCOM, se consideraron varios parámetros a los cuales se les evaluó su influencia en los resultados. Estos parámetros fueron: Radiación solar, Coeficiente de extinción de la luz, nubosidad. Adicionalmente, se consideró el estudio de las condiciones de frontera de salinidad, (tanto en la frontera de mar abierto como en las fronteras abiertas de los caños), y de marea. El campo de vientos utilizado durante esta etapa corresponde a aquel medido en campo durante la campaña de medición, sin embargo un análisis de sensibilidad fue necesario para definir la magnitud de la velocidad, pues éste fue medido en tierra y asumido constante en todo el dominio lo cual involucra imprecisiones.

Debido a que no se hallaron registros de Radiación Solar de onda Larga (utilizada por el modelo ELCOM), se procedió a calcularla de manera analítica con las expresiones que proponen Martin y McCutcheon, 1999. La serie correspondiente al período de la campaña de campo se presentó en la Figura 5-17, en el numeral 5.3.3.2

Los valores de radiación solar y de nubosidad definitivos para la etapa de calibración se obtuvieron después de un análisis de sensibilidad de estos parámetros con los perfiles de temperatura del agua. Se consideraron casos en los cuales se obtuvo calentamiento excesivo del agua y de enfriamiento excesivo, para una condición dada de vientos (vientos medidos durante la campaña de campo). A pesar de algunas diferencias obtenidas entre los

perfíles de temperatura simulados y los medidos en campo, se encontró que su influencia en los perfíles de salinidad y de densidad del agua es muy baja. Esto se debe a que las variaciones de la densidad del agua que se tienen se deben a la estratificación del agua salina-dulce, dejando el efecto de la temperatura a un segundo nivel de influencia. De este análisis se obtuvo que el valor de radiación solar a utilizar en el modelo corresponde al 80% del valor obtenido durante las mediciones de campo mostradas en la Figura 5-17.

El coeficiente de extinción de la luz, el cual influye la profundidad a la cual se calienta el agua cercana a la superficie, tampoco mostró una sensibilidad importante que afecte la salinidad, a pesar de las zonas de alta turbidez que se tienen en zonas cercanas a las bocas de los caños. La razón para este comportamiento es la misma que se mencionó en el párrafo anterior.

Con respecto a la marea, se compararon las series de tiempo medidas en la estación de Cholón con aquellas que se obtienen utilizando el programa X-tide tal como se explicó en el numeral 5.3.3.1. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestran los registros medidos del nivel del agua en la estación de Cholón, en la estación de La Paz para el período que coincide con la campaña de campo (Octubre 15 a Octubre 22 de 2008) y graficadas cada una con relación a un nivel de referencia propio. De esta figura puede observarse que las señales de Cholón y La Paz están en fase y tienen la misma amplitud con algunas pequeñas diferencias, especialmente durante los dos primeros días de mediciones. El rango de la marea para este período en estas estaciones fluctúa entre 40 y 45 cm con una componente diurna muy clara y otra semi-diurna que se hace evidente al final del período de medición. La señal en la estación de La Paz, en general, está del orden de 5 cm por encima de la señal en Cholón. Para la etapa de calibración del modelo ELCOM se utilizará la señal de marea medida en la estación de Cholón, sin ningún ajuste.

El campo de vientos utilizado para esta etapa de calibración corresponde al medido en campo afectado por un factor de 1,5 en la magnitud de la velocidad. La obtención de este factor de amplificación se basó en un proceso de análisis de sensibilidad comparando perfíles de temperatura y salinidad obtenidos a partir de un campo de vientos y comprados con los perfíles medidos. Este campo final de vientos (afectado por el factor de amplificación) concuerda bien con los registros obtenidos, durante algunos días, del anemómetro del barco utilizado en las mediciones. Un estudio detallado sobre el campo de vientos se requiere para una etapa posterior en la cual se deberá considerar la variación espacial del campo de vientos. La serie de tiempo de velocidad y dirección del viento se mostraron en la Figura 5-13.

En las fronteras abiertas, la condición de salinidad se especificó como un perfil de salinidad constante en el tiempo y en la vertical, de la siguiente manera: en la frontera oceánica se especificó un perfil constante de 36 ppm de salinidad, que corresponde a las condiciones oceánicas normales; este valor fue el que produjo los mejores resultados, contra las mediciones, en la región cercana a la entrada de la bahía. A pesar de que en las mediciones el valor típico de salinidad oceánica fue de 40 ppm, se consideró mejor dejar la condición de borde en 36 ppm; este hecho se manifestará en los resultados del modelo, tal como se explica más adelante. Por otro lado, la salinidad a especificar en las bocas de los caños requirió de un análisis de sensibilidad, que obligó, finalmente, a especificar salinidad de 0

ppm allí. La importancia de este valor radica en su efecto sobre la dispersión de la cuña de agua dulce en superficie sobre el agua oceánica, más profunda.

Con el propósito de reducir el efecto de las condiciones iniciales en los resultados del modelo, y por lo tanto para reducir el tiempo de “calentamiento” del modelo, se especificaron perfiles de salinidad y temperatura iniciales semejantes a aquellos medidos en campo.

De los parámetros numéricos del modelo, diferentes al de la discretización espacial, (mallas), el que mas influencia tiene sobre los resultados es el intervalo de cálculo, (dt). Para la malla gruesa utilizada en la calibración, se utilizó un dt=240 s, valor un poco conservador pero que garantiza estabilidad del modelo para las condiciones simuladas, (CFL del orden de 0,4, valor menor que el máximo de 0,7 recomendado en el manual del usuario). Con este intervalo de cálculo, una corrida típica de 17 días de simulación requiere de 2 horas de CPU en un computador de escritorio con un buen procesador, tiempo que no se reduce sustancialmente para un dt mayor y que cumpla con la condición de estabilidad.

Finalmente, para las corridas de calibración se consideró un tiempo de simulación de 17 días del año 2008, entre el 06 de Octubre a las 0:00 y el 23 de Octubre a las 0:00. De estos 17 días, los primeros 10 corresponden al período de “calentamiento” del modelo y el intervalo entre el 16 de Octubre y el 22 de Octubre corresponde al de la campaña de medición.

Dadas las condiciones de flujo estratificado por salinidad, que se esperan para la Bahía Barbacoas, por la interacción entre la pluma de agua dulce descargada por los caños y el agua oceánica proveniente del mar Caribe, la calibración consideró la comparación entre los perfiles simulados de salinidad y los correspondientes a las estaciones de medida en la campaña de campo. Como se explicó atrás, la temperatura tiene poco efecto sobre los perfiles de densidad y por lo tanto no se consideró relevante para la calibración.

Durante la campaña de medición, se definieron las estaciones de medición X01 a X09, (Ver Figura 5-18). En ellas se realizaron mediciones los días 18 y 22 de Octubre. El 18 de Octubre se hizo el recorrido de las estaciones en sentido horario, comenzando a las 6:40 a. m. en la estación X01 y terminando a la 1:40 p.m., en la X09. El 22 se hizo el recorrido en sentido anti horario, comenzando a las 8:11 a.m en la estación X09 y terminando a las 2:32 p.m en la estación X01. Las estaciones cubren toda la Bahía, y se encuentran localizadas en zonas de influencia de las plumas de agua dulce (X05, X06), en zonas de aguas oceánicas, (X01, X02 y X09), y en zonas de transición, (X03, X04, X07 y X08), dando una muy buena idea de la distribución espacial de la salinidad. La variación temporal se obtiene al comparar los perfiles de salinidad simulados y medidos en los días 18 y 22 de octubre.

Los resultados finales de la calibración se muestran en la Figura 5-23 y Figura 5-24, para los días Octubre 18 y Octubre 22, respectivamente.

La comparación entre los perfiles de salinidad simulados y los medidos en el día 18 de Octubre se muestra en la Figura 5-24. En esta figura se muestran, para cada estación, dos perfiles simulados, uno al tiempo mas cercano al inicio de la medición del perfil (línea azul) y otro al tiempo mas cercano a la finalización de la medición del perfil (línea roja). Típicamente,

la medición de un perfil tomó entre 20 y 30 minutos y entre los perfiles simulados mostrados en la figura hay una diferencia de una hora.

Para la zona de influencia oceánica, estaciones X01, X02 y X09, la comparación de los perfiles simulados y medidos muestra una buena correspondencia. Hasta profundidades de 5 m aprox., los perfiles simulados capturan muy bien las características del perfil medido (gradientes, por ejemplo) y a profundidades mayores se muestran unas diferencias que corresponden a los valores altos de salinidad, valores por fuera del rango físico, y que en el modelo corresponden al valor asignado como condición de frontera: agua oceánica con salinidad de 36 ppm. Obsérvese que la estación X02 está a una menor profundidad que las mediciones, efecto de la discretización horizontal del modelo.

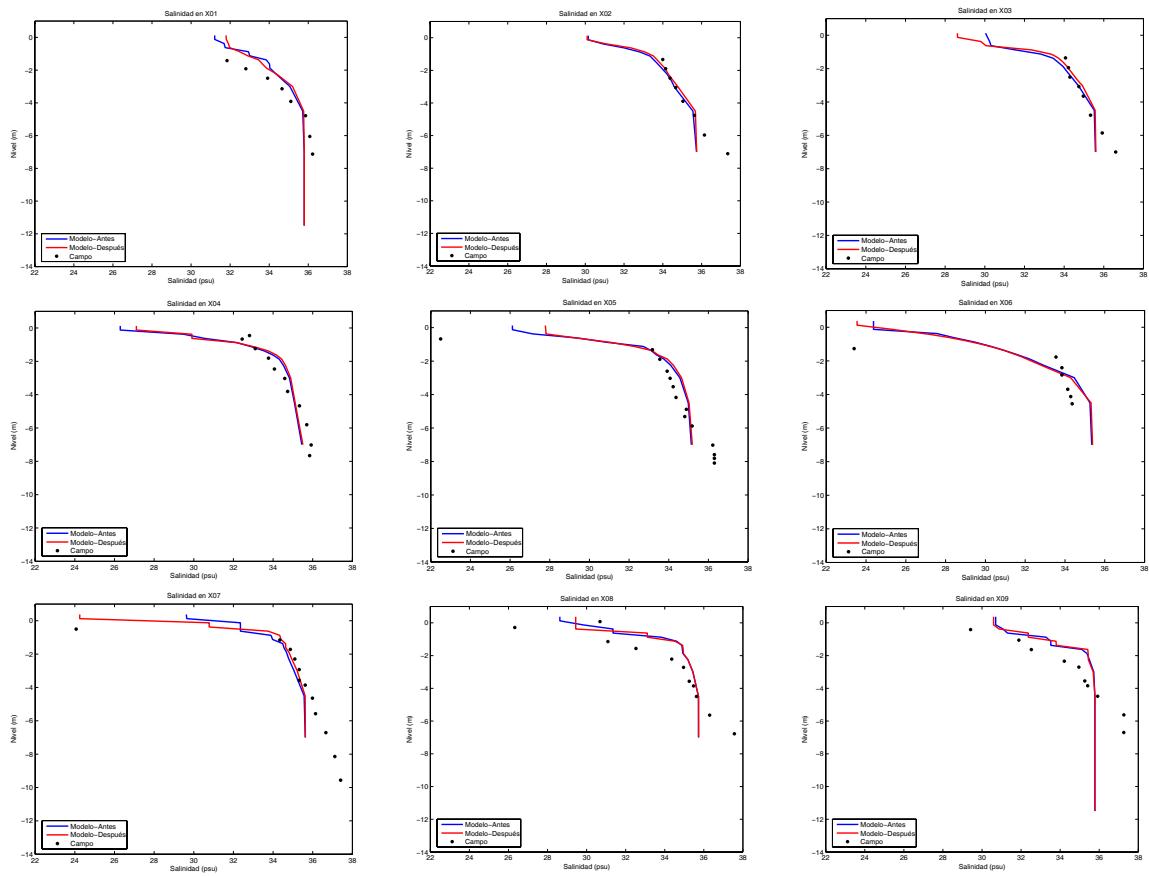
En la zona de influencia de las plumas de agua dulce, (estaciones X05, X06), el modelo predice salinidades mayores que las mediciones cerca a la superficie con diferencias entre 4 ppm y 20 ppm, pero capturando adecuadamente la forma del perfil medido. La mayor diferencia se encuentra en la estación X06, y se puede disminuir aumentando la resolución de la malla horizontal en esta región, como se mencionó atrás. En general, una mayor resolución de la malla horizontal corregirá esta diferencia, pues parece que la resolución de la malla vertical es adecuada dado que el modelo captura la localización de la halocina.

En la zona de transición, el modelo capture adecuadamente las características del perfil de salinidad medido, con pequeñas diferencias. Por ejemplo, en la estación X03 los perfiles simulados son menos salinos en la superficie aunque no se tiene buena resolución en las mediciones a profundidades menores de 1 m para confirmar esta diferencia, mientras que en la estación X04 las salinidades superficiales simuladas son ligeramente menores que las medidas. En las estaciones X07, X08 y X09, los perfiles simulados y los medidos concuerdan muy bien, a pesar de que los perfiles simulados presentan salinidades menores a profundidades mayores a 8 m, y que corresponden a la condición de frontera de aguas oceánicas con salinidades de 36 ppm que difiere de las mediciones con valores de 40 ppm.

La comparación entre los perfiles simulados y los medidos durante el día 22 de Octubre se muestra en la Figura 5-24. Las estaciones con influencia oceánica, en este día muestran un mejor comportamiento que el reportado en el día 18. Los perfiles simulados concuerdan bastante bien con los medidos (en forma y en magnitudes), especialmente en las estaciones X01 y X02. En la estación X09, se aprecian una diferencias en magnitud pero las simulaciones capturan muy bien la forma del perfil medido. Como en el caso del día 18, las salinidades simuladas a profundidades mayores a 8 m son ligeramente menores que las mediciones cuyos valores se acercan a 40 ppm, valores altos.

Para las estaciones con influencia de las plumas de agua dulce, los resultados del modelo siguen el mismo comportamiento que el reportado para el día 18: las simulaciones reportan mayores salinidades en superficie que las mediciones, pero la forma de los perfiles simulados se ajusta bien a la forma de los perfiles medidos. Las grandes diferencias en superficie en la estación X06 se pueden reducir al mejorar la resolución espacial en sus vecindades.

Figura 5-23: Perfiles de salinidad simulados y medidos, estaciones X01 a X09, Oct. 18



En las zonas de transición, los resultados del modelo siguen el mismo comportamiento que el reportado en el día 18: el modelo captura adecuadamente la forma de los perfiles aunque se muestran algunas diferencias menores cerca de la superficie.

Figura 5-24: Perfiles de salinidad simulados y medidos en las estaciones X01 a X09

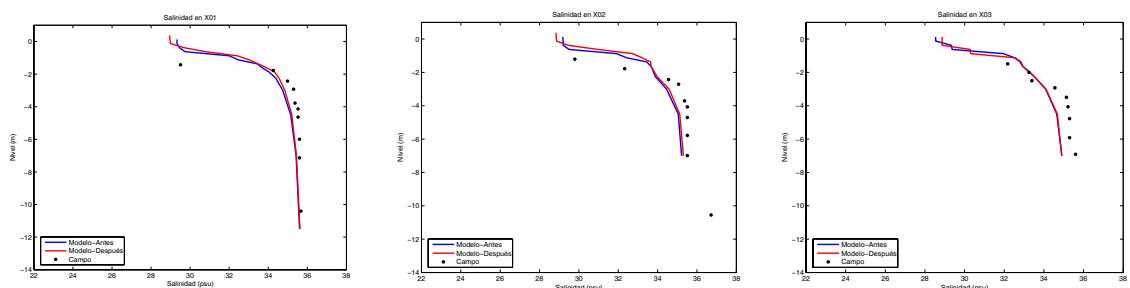
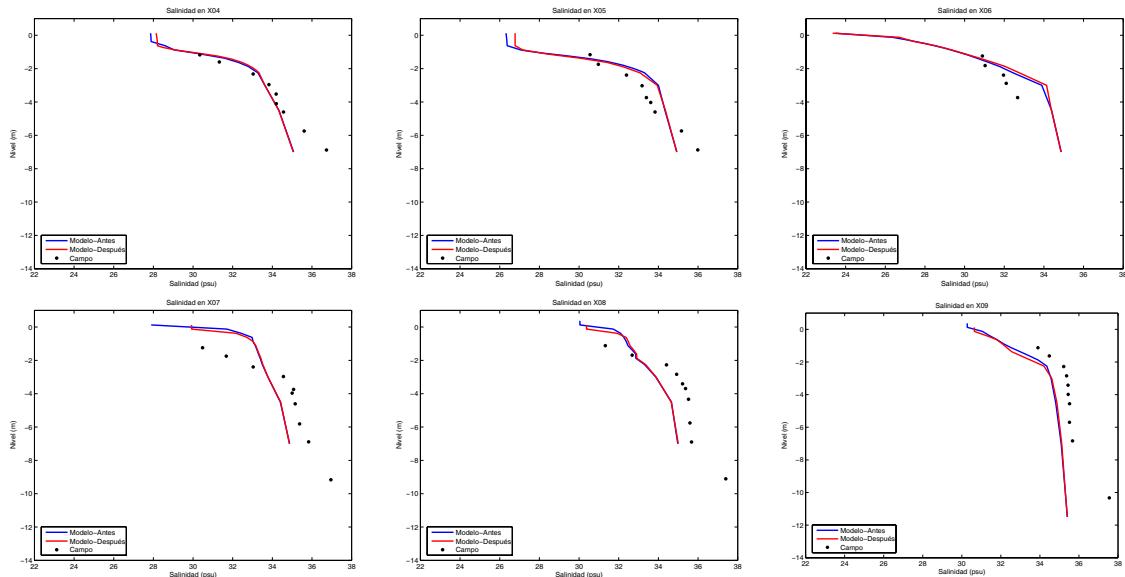


Figura 5-24: Perfiles de salinidad simulados y medidos en las estaciones X01 a X09



De acuerdo con los resultados reportados en los párrafos anteriores se puede concluir que el modelo está adecuadamente calibrado para las condiciones consideradas. La discretización de la malla horizontal tiene un efecto menor en los patrones generales de circulación, aunque en las regiones cercanas a las bocas el efecto puede ser importante. Este efecto que se puede minimizar, en casos futuros, mejorando la resolución de malla horizontal en estas zonas. El hecho de que el modelo capture la forma de los perfiles de salinidad garantiza que la física de los procesos (interacciones entre la pluma de agua dulce y el agua oceánica) presentes en la Bahía Barbacoas está adecuadamente representada por el modelo. Consideramos que la calibración del modelo ha sido exitosa y que los refinamientos de malla horizontal que se han mencionado no afectan los patrones generales de circulación en la bahía y, por lo tanto, los resultados de la aplicación del modelo para el análisis de los casos de estudio serán adecuados en términos de patrones de circulación.

En un estudio posterior, se puede afinar el modelo (densificando la malla horizontal) para poder garantizar una mejor precisión en la determinación de variables como velocidad de avance de los frentes de agua dulce, concentraciones de trazadores, tiempos de viaje del frente de aguas dulces, etc.

5.4.3. Selección de casos de simulación

Luego de algunas simulaciones preliminares y de terminado el proceso de calibración del modelos, se detectó que las fuerzas externas más importantes para la dinámica del sistema son los vientos y los caudales afluente. Se detectó que la variabilidad temporal en los caudales afluente y en la magnitud y dirección del viento no han estado históricamente en fase, por lo que hay condiciones críticas para el transporte de sedimentos hacia las Islas del Rosario que están determinados por altos caudales afluente, pero también otros escenarios críticos definidos por la magnitud y dirección del viento. Considerando además que un

análisis de un par de situaciones críticas no da una idea real de las condiciones largo plazo, esta elección de escenarios de modelación está acompañada de un análisis de probabilidad de ocurrencia conjunta de eventos de viento y caudal.

Este análisis se basa en hallar la probabilidad de que ocurra conjuntamente un viento dado de caudal con un evento dado de velocidad del viento y se debe repetir el análisis para diferentes direcciones de viento.

Los datos utilizados para velocidad del viento son tomados de la base de datos del reanálisis regional NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) que tiene resolución temporal de 3 horas y resolución espacial de 0.25 grados. Se escogió para el análisis el punto del modelo de reanálisis más cercano a las Islas del Rosario (ver Figura 5-6). Por otra parte, los datos de caudal se toman de los resultados de la simulación del Canal del Dique realizado por la Universidad Nacional – sede Bogotá en su estudio de restauración del Canal del Dique (2007), en combinación con resultados tomados en la estación de medición Incora entre 1984 y 2000.

En este caso se hizo el análisis para vientos y caudales medios mensuales en el periodo comprendido entre enero de 1984 y diciembre de 2000, periodo suficiente para captar la variabilidad intranual, asociada principalmente a la variación de la zona de convergencia intertropical, y la variación interanual, asociada principalmente a las dos fases del ENSO, obteniendo así las condiciones de máximo invierno y máximo verano. Para considerar la variación de la dirección del viento, se hace el análisis en las ocho direcciones principales: vientos provenientes del norte, del noreste, del este, del sureste, del sur, del suroeste, del oeste y del noroeste. La Figura 5-25 muestra los resultados del análisis de probabilidad conjunta para vientos provenientes del noreste, del noroeste, del suroeste y del sur, por ser estas direcciones las más probables o las más críticas en el sentido de favorecer el transporte superficial en dirección a las islas del Rosario. Cabe mencionar, de todas maneras, que para las otras direcciones no se encontraron mayores diferencias. Estas cuatro direcciones fueron seleccionadas como las representativas para el análisis de alternativas en los casos de simulación. En la Figura 5-8 se muestra la probabilidad de ocurrencia asociada a cada una de las direcciones de viento.

Una vez se determinaron los parámetros de velocidad del viento y caudales afluentes a la bahía, se pasó a buscar en las series de viento y caudales las épocas del año en las series de tiempo para las cuales se presentaron conjuntamente los parámetros seleccionados de la Figura 5-25 para cada una de las direcciones dominantes. Este análisis arrojó como resultado cuatro épocas, de las cuales se extraen períodos de tiempo de 20 días de las respectivas series de viento para ser utilizadas en el modelo. Estos períodos son:

- Época I: Entre el 10 de diciembre de 1990 hasta el 30 de diciembre de 1990.
- Época II: Entre el primero de marzo de 1991 hasta el 20 de marzo de 1991.
- Época III: Entre el primero de septiembre de 1989 hasta el 20 de septiembre de 1989.
- Época IV: Entre el 5 de julio de 1990 hasta el 25 de julio de 1990.

La época I se caracteriza por tener vientos del Noreste con una frecuencia de ocurrencia alta (cerca al 25% del tiempo). Esta dirección de vientos favorece las corrientes superficiales saliendo de la Bahía de Barbacoas. Como caso relevante, se refuerza por el hecho de considerar caudales altos de los efluentes.

La época II considera la misma situación de campos de viento pero ahora con la utilización de caudales efluentes bajos se busca medir el efecto del campo de vientos.

La época III es el resultado de considerar vientos del Noroeste con una frecuencia de ocurrencia más baja que la de las dos épocas anteriores pero ahora considerando caudales efluentes grandes. Los vientos del Noroeste son vientos que inducen corrientes superficiales hacia la Bahía Barbacoas y en ese caso serían eventos que son favorables para minimizar el efecto de los sedimentos que eventualmente alcancen las islas del Rosario. Los caudales en este caso son altos con una baja probabilidad de ocurrencia.

La época IV considera vientos del Noroeste y caudales de efluentes con una probabilidad de ocurrencia dentro del margen de mayor permanencia, tratando de buscar una condición que refleje la mayor ocurrencia (combinada) de eventos de viento y caudales.

Las demás combinaciones de caudales y vientos se consideraron deberían tener menor relevancia con respecto a que la pluma de sedimentos alcanzara las islas del Rosario. Son casos que consideran campos de viento con probabilidades de ocurrencia mucho menores que las consideradas en los 4 casos escogidos o con caudales efluentes también con probabilidades de ocurrencia menores que las asignadas a los 4 casos escogidos.

Las Figura 5-26 a Figura 5-29 muestran las series de viento de cada una de estas épocas que serán utilizadas en el análisis de alternativas. Estas series ya tienen incluido el factor de amplificación de 1,5 obtenido para la magnitud de la velocidad del proceso de calibración del modelo.

Figura 5-25: Probabilidad conjunta de ocurrencia de vientos y caudales totales por las bocas Correa, Matunilla y Lequerica

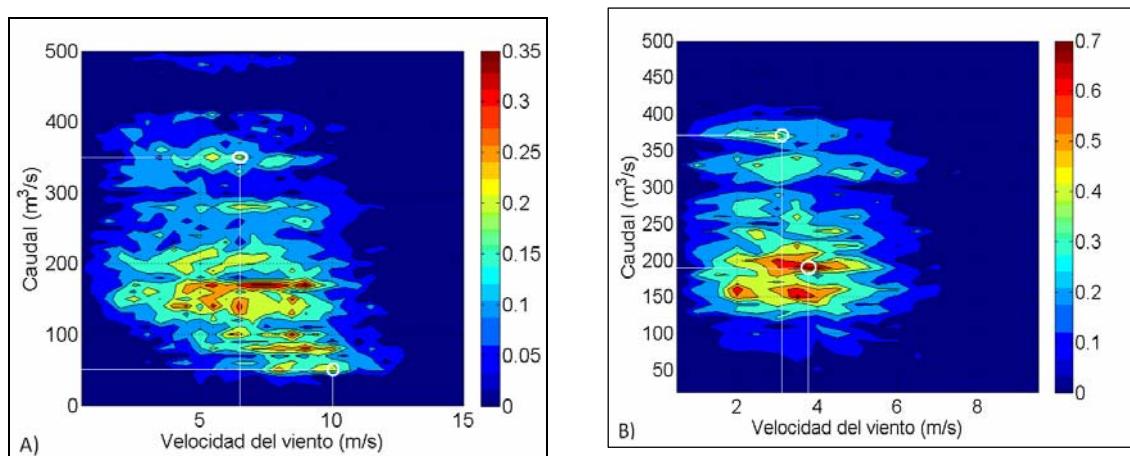
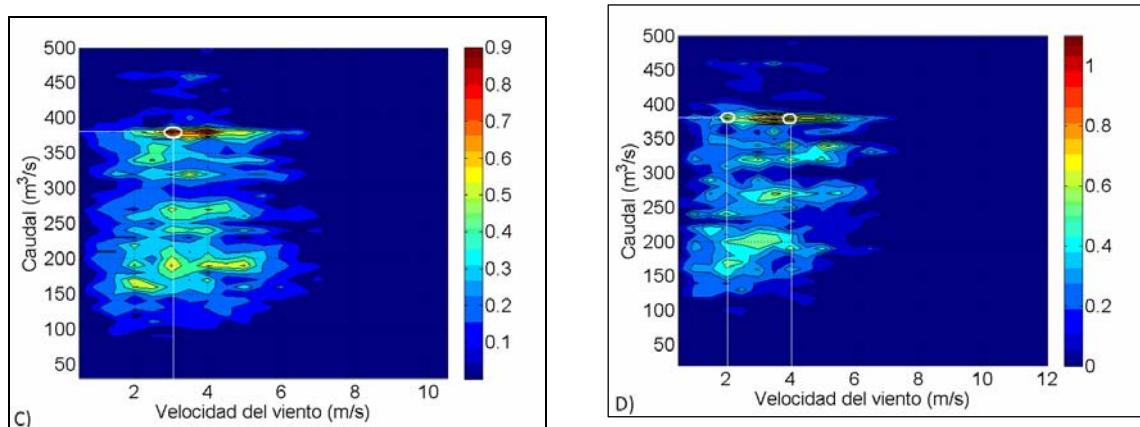


Figura 5-25: Probabilidad conjunta de ocurrencia de vientos y caudales totales por las bocas Correa, Matunilla y Lequerica



A) Vientos en dirección noreste, B) Vientos en dirección noroeste, C) Vientos en dirección suroeste D) Vientos en dirección sur. En cada figura se encierran los parámetros (viento y caudal) seleccionados para las simulaciones de las diferentes alternativas.

Dada la buena correspondencia entre las señales medidas de marea y la generada sintéticamente, para las simulación de las diversas alternativas se utilizará la señal de marea generada a partir del software WX_tide para los períodos correspondientes y teniendo en cuenta una corrección en la fase (2 horas) de la señal generada y un ajuste del nivel de referencia de 10 cm para esta señal, de modo que coincide con el nivel de referencia de la batimetría, nivel de referencia del modelo ELCOM. Las series de tiempo de mareas para estas cuatro épocas climáticas se presentan en las **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** a Figura 5-32.

Figura 5-26: Velocidad y dirección del viento para la época climática I

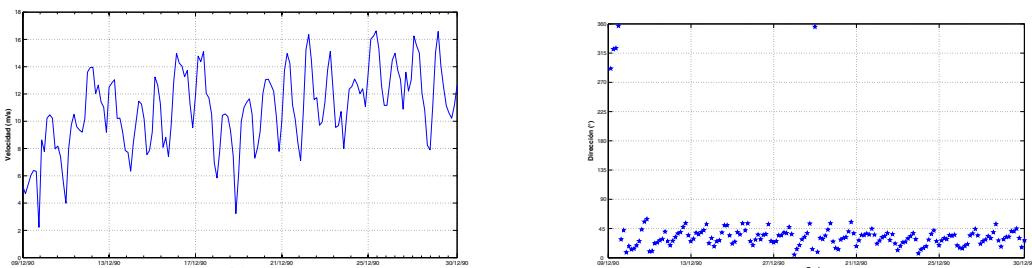


Figura 5-27: Velocidad y dirección del viento para la época climática II

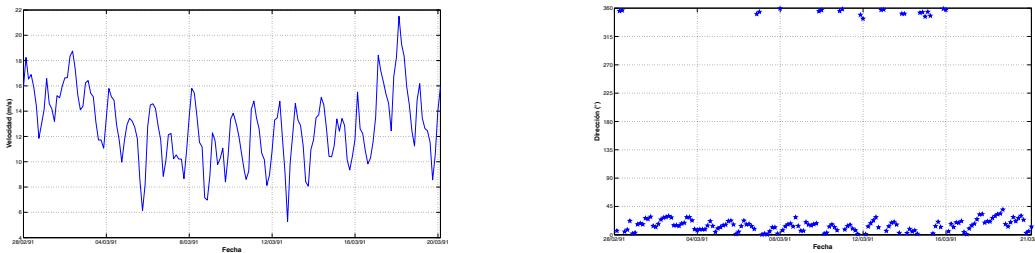


Figura 5-28: Velocidad y dirección del viento para la época climática III

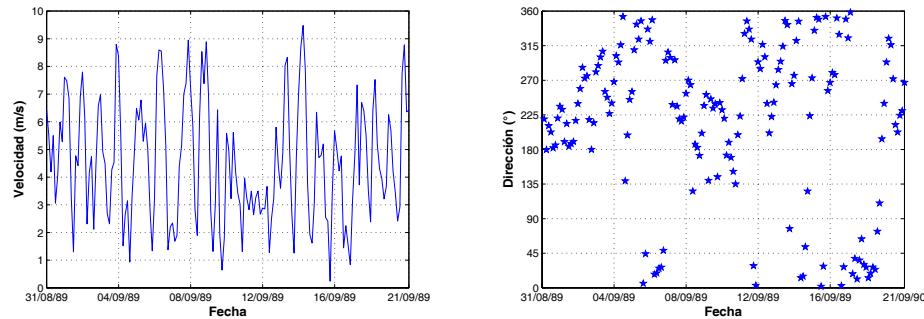


Figura 5-29: Velocidad y dirección del viento para la época climática IV

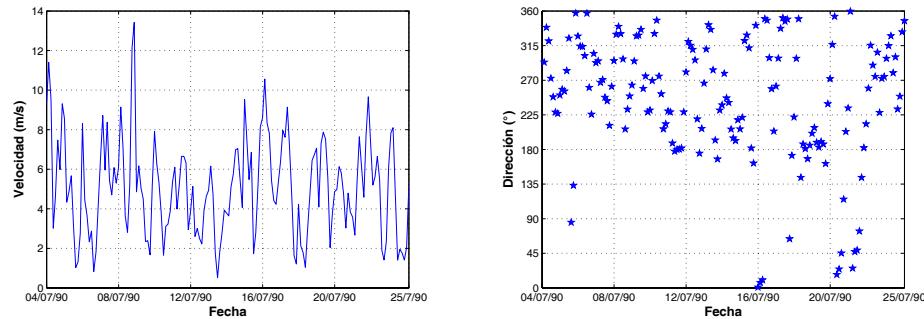


Figura 5-30: Serie sintética de marea, Febrero 28 a Marzo 20 de 1991

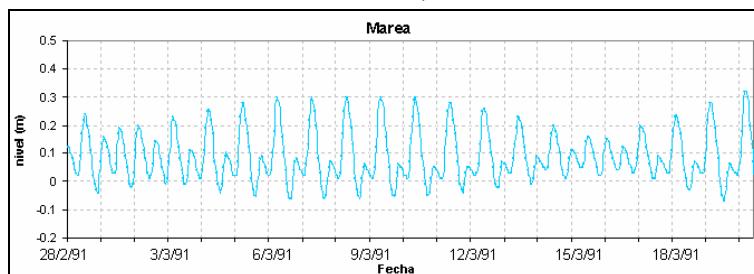


Figura 5-31: Serie sintética de marea, Septiembre 01 a 20 de 1989

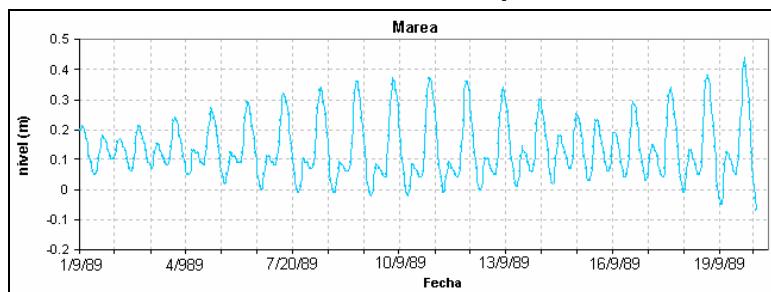
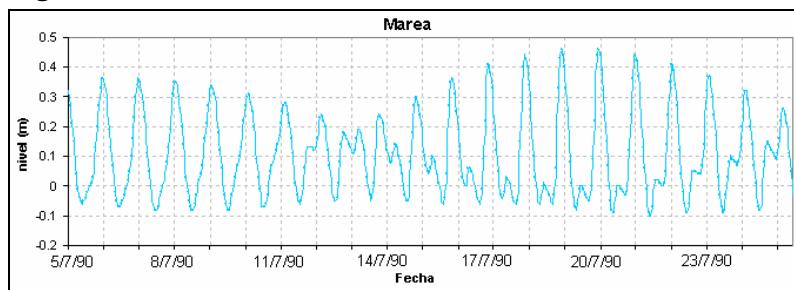


Figura 5-32: Serie sintética de marea, Julio 05 a 25 de 1990



Las series de radiación solar, calculadas a partir del método de Martin y McCutcheon, 1999, correspondientes a las cuatro épocas climáticas definidas anteriormente se presentan en las Figura 5-33 a Figura 5-36.

Figura 5-33: Serie sintética de Radiación Solar de Onda Larga durante el período Diciembre 09 a Diciembre 29 de 1990

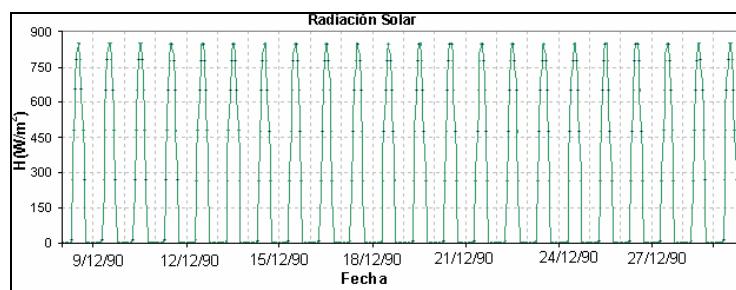


Figura 5-34: Serie sintética de Radiación Solar de Onda Larga durante el período Febrero 28 a Marzo 20 de 1991

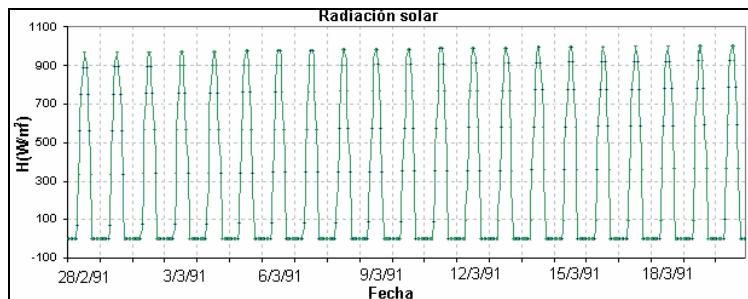


Figura 5-35: sintética de Radiación Solar de Onda Larga durante el período Septiembre 01 a Septiembre 20 de 1989

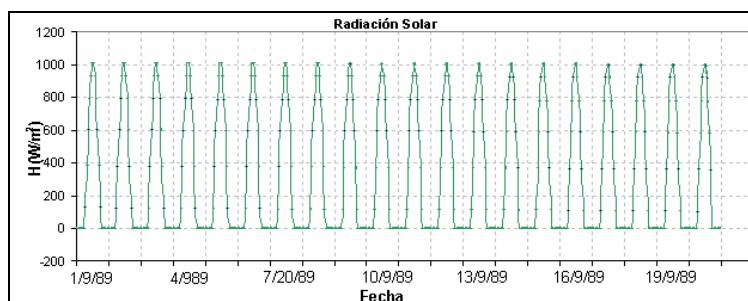
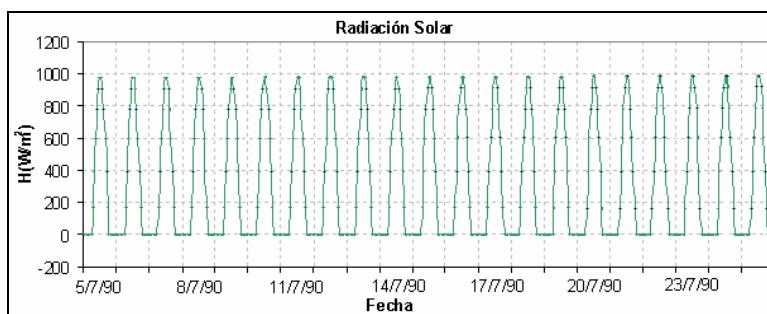


Figura 5-36: Serie sintética de Radiación Solar de Onda Larga durante el período Julio 01 a Julio 25 de 1990



Las variables Temperatura y Humedad relativa del aire se tomaron iguales para cada época y cada una de ellas se generó como una serie de longitud igual a la longitud de la época y compuesta como una serie de ciclos diarios promedios obtenidos a partir de las mediciones de campo. Estos ciclos diarios promedio se presentaron en las Figura 5-9 y Figura 5-10.

Finalmente, para la simulación de diferentes escenarios en el Canal del Dique, la Universidad Nacional – sede Bogotá por medio del modelo hidráulico construido para el proyecto, suministró las series de caudal en los caños Correa, Matunilla y Lequerica para un periodo de 4 años y para 6 alternativas propuestas. Estas series fueron analizadas para determinar las condiciones más desfavorables en el canal y utilizando el software de simulación,

determinar las variaciones en el tiempo del caudal en la desembocadura de cada uno de los caños. Los escenarios de caudales a estudiar que fueron seleccionados son

- Alternativa 1 (A1): Condiciones actuales.
- Alternativa 2 (A2): Con compuerta-esclusa en el km 104 entre Lequerica y Matunilla.
- Alternativa 3 (A3): Canal con tres angostamientos y sin compuerta-esclusa.
- Alternativa 4 (A4): Canal con tres angostamientos + compuerta-esclusa en km 104
- Alternativa 5 (A5): Canal con compuerta-esclusa en k110 aguas abajo de Lequerica.
- Alternativa 6 (A6): Canal con compuerta-esclusa en k110 + tres angostamientos.

Los caudales por cada una de las bocas y el caudal total por el canal del Dique que se obtienen para el período de 4 años analizado en el modelo físico y para cada una de las 6 alternativas definidas en el párrafo anterior se presentan en las Figura 5-37 a Figura 5-40.

Figura 5-37: Caudales por la Boca Caño Correa para las seis alternativas y para el período Enero 1 de 1988 a Octubre 01 de 1991

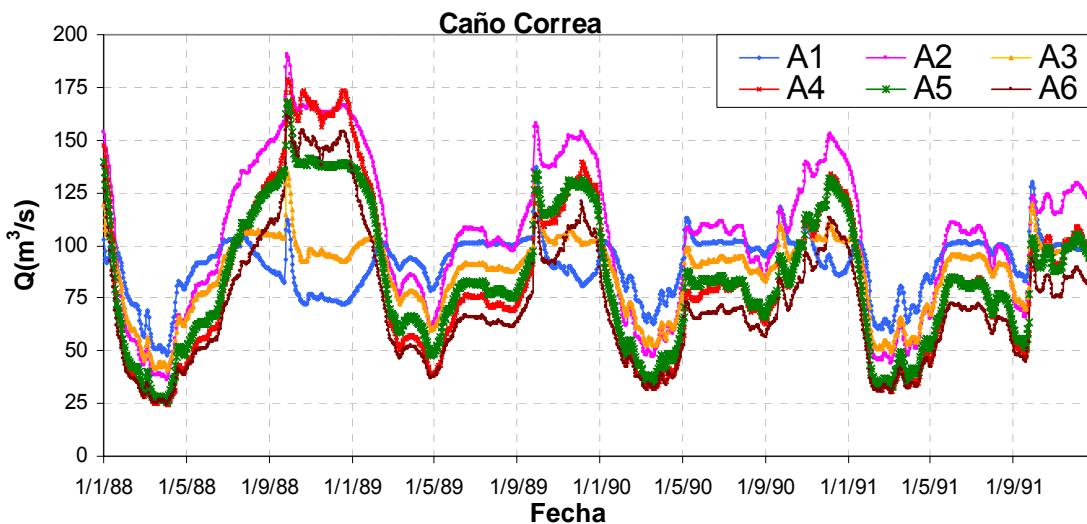


Figura 5-38: Caudales por la Boca de Matunilla para las seis alternativas y para el período Enero 1 de 1988 a Octubre 01 de 1991

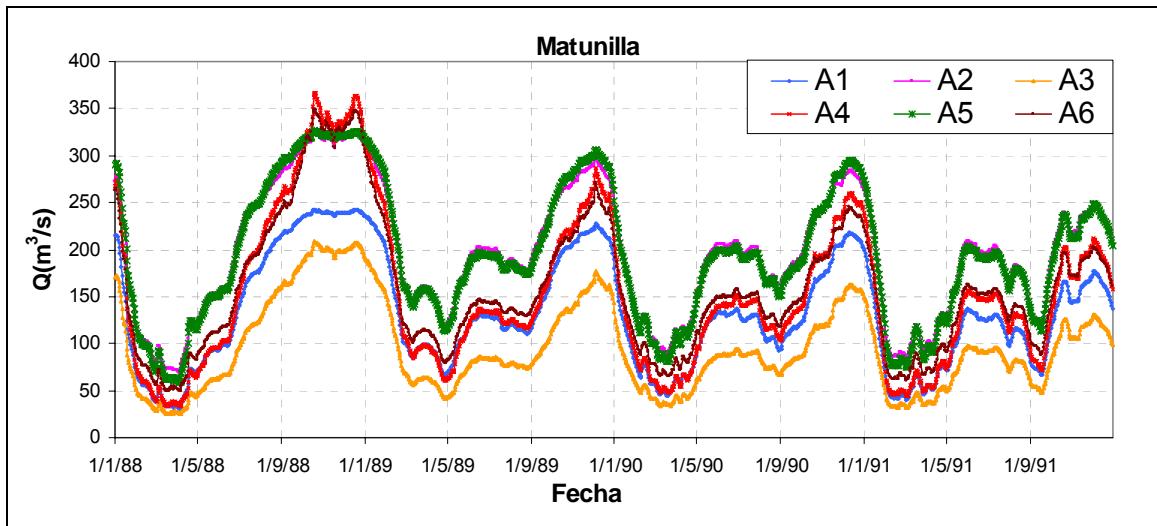


Figura 5-39: Caudales por la Boca de Lequerica para las seis alternativas y para el período Enero 1 de 1988 a Octubre 01 de 1991

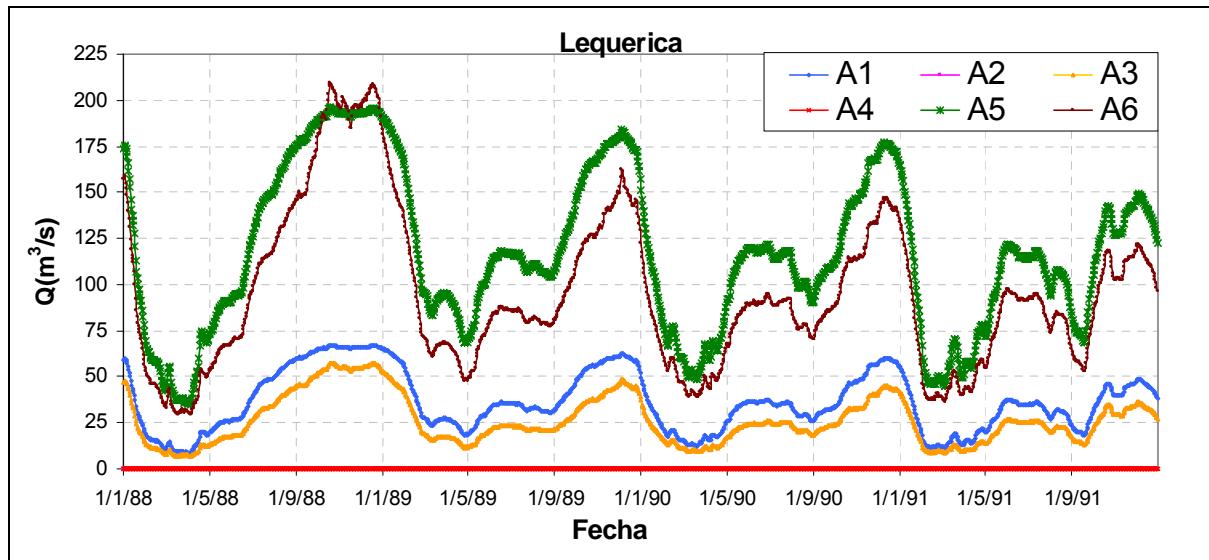
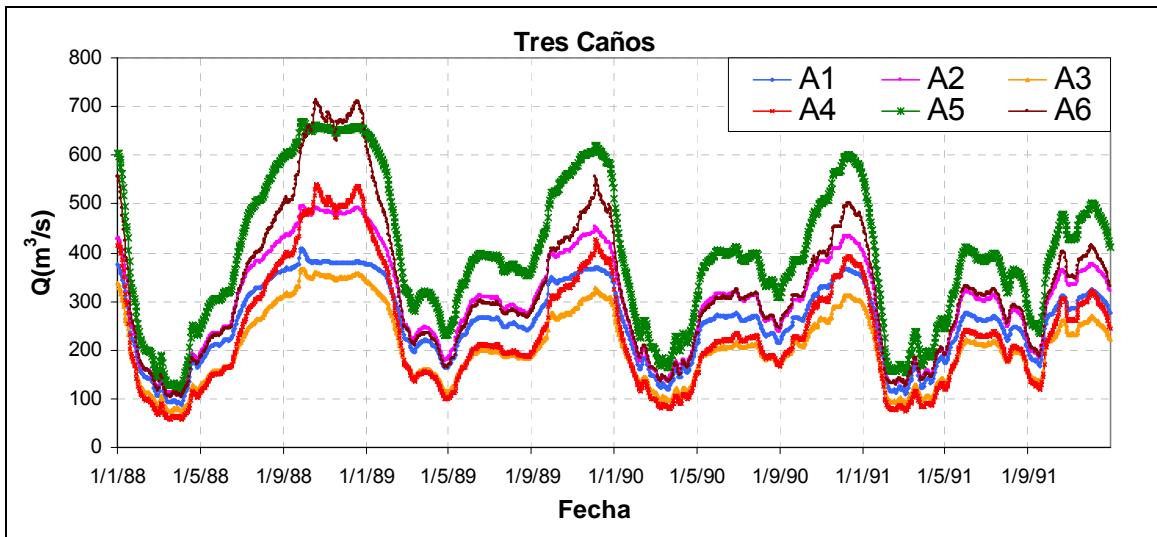


Figura 5-40: Caudales por las tres bocas para las seis alternativas y para el período Enero 1 de 1988 a Octubre 01 de 1991



Teniendo en cuenta las series de tiempo de caudales presentadas en las Figura 5-37 a Figura 5-40, se procedió a obtener los caudales por cada una de las bocas correspondientes a las 4 épocas climáticas obtenidas del análisis de probabilidad conjunta viento-caudales. Una análisis de estas series mostró que estos caudales varían muy poco (menos del 1%) para los períodos de 20 días correspondientes a cada época climática. Por lo tanto, en las simulaciones se utilizaron los caudales iguales al promedio de los valores correspondientes al período de 20 días de cada una de las 4 épocas y constantes en el tiempo. La Tabla 5-3 y Tabla 5-4 presentan estos caudales.

Tabla 5-3: Caudales (m^3/s) por cada boca, para cada alternativa y para las épocas I y II

	09-29 /12_1990			28/02 - 20/03 _1991		
	Correa	Matunilla	Lequerica	Correa	Matunilla	Lequerica
A1	87.36	213.61	58.99	68.52	52.03	14.36
A2	146.06	278.63	0.00	52.06	98.11	0.00
A3	103.37	161.29	44.55	56.44	38.20	10.55
A4	35.85	55.01	0.00	128.24	253.18	0.00
A5	124.72	290.12	174.02	39.85	92.25	55.33
A6	106.45	238.67	143.14	34.60	72.12	43.25

Tabla 5-4: Caudales (m^3/s) por cada boca, para cada alternativa y para las épocas III y IV

	01 - 20 /09_1989			05 - 25 /07_1990		
	Correa	Matunilla	Lequerica	Correa	Matunilla	Lequerica
A1	102.64	132.51	36.59	101.54	127.28	35.15
A2	110.33	204.19	0.00	107.11	198.68	0.00
A3	93.67	87.57	24.18	93.91	89.95	24.84
A4	79.05	138.64	0.00	80.22	142.79	0.00
A5	85.34	198.80	119.24	81.86	192.85	115.68
A6	68.94	147.99	88.75	68.77	149.92	89.91

Una vez definidas las épocas climáticas relevantes, los parámetros climáticos (radiación solar, humedad relativa, temperatura del aire) y los agentes forzadores (vientos, marea y caudales por los caños) se corrió el modelo ELCOM para combinaciones de épocas climáticas y agentes forzadores con cada alternativa. Los resultados se presentan a continuación.

5.4.4. Resultados de la modelación numérica

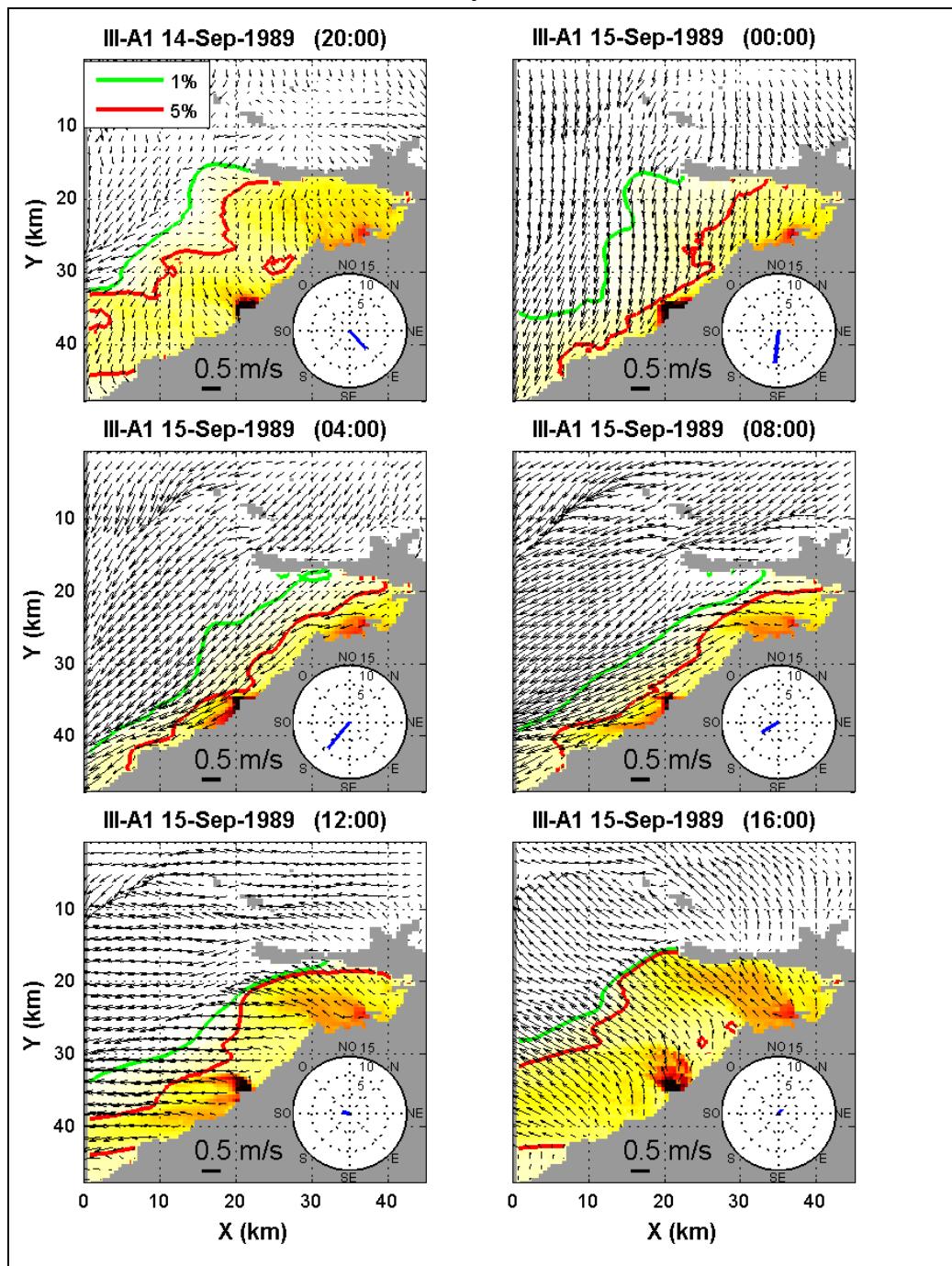
Los resultados de la modelación muestran que la concentración del trazador empleado para dar una idea de las concentraciones de sedimentos en suspensión cambia en el tiempo y en el espacio como resultado de las corrientes generadas por la marea y, sobretodo, por el viento. La Figura 5-41 muestra, a manera de ejemplo, la distribución superficial de concentración de trazador en seis instantes de tiempo durante un día. Se aprecia como la pluma de trazador se comprime y luego se extiende durante un día de la época III con condiciones de la alternativa 1. En este caso, la pluma es inicialmente transportada hacia la costa suroriental por la acción de los vientos entre las 20:00 horas del día 14 y las 8:00 horas del día 15. Al cesar la acción del viento, la pluma se extiende hacia el oriente, cubriendo toda la bahía. No se observa ninguna corriente periférica dominante que pudiera ser un medio preferencial para el transporte del trazador. Se aprecia que el trazador llega a la costa de la Isla de Barú proveniente de la boca del Caño Matunilla atravesando transversalmente la bahía y no como una corriente continua a lo largo de la costa. Esta forma de transporte es típica en todas las alternativas estudiadas, lo que sugiere que la construcción de obras perpendiculares a la costa no contribuiría significativamente a la reducción del transporte de sedimentos hacia las Islas del Rosario.

La estructura vertical de la pluma (Figura 5-42) muestra que las concentraciones importantes de trazador se observan en una delgada capa superficial de unos 2 m de espesor a excepción del extremo final del corte que se encuentra relativamente cerca de la boca del caño Correa, en donde se profundiza hasta unos 5 m. Esta estructura no se cambia significativamente entre todas las alternativas estudiadas. A pesar de que la profundidad de la pluma también varía debido fundamentalmente a cambios en la magnitud del viento, los valores significativos de concentración de trazador se encuentran siempre cerca de la superficie, por lo que los campos superficiales de trazador son un buen indicador para comparar las condiciones generadas por las diferentes alternativas.

Dado el carácter cíclico del fenómeno, una forma adecuada de estudiar las condiciones en la bahía es mirar la concentración medias en un período dado de tiempo que cubra varios ciclos diarios. La Figura 5-43 muestra la situación superficial para la concentración de trazador y la velocidad para todas las alternativas durante la época climática I obtenida como el promedio de los últimos 10 días de simulación. Se aprecia que la pluma se mantiene recostada sobre la margen suroriental de la bahía y hacia el sur debido a la acción del viento, alejándose de las Islas del Rosario independientemente de la alternativa. Este comportamiento se repite durante la época climática II (Figura 5-44).

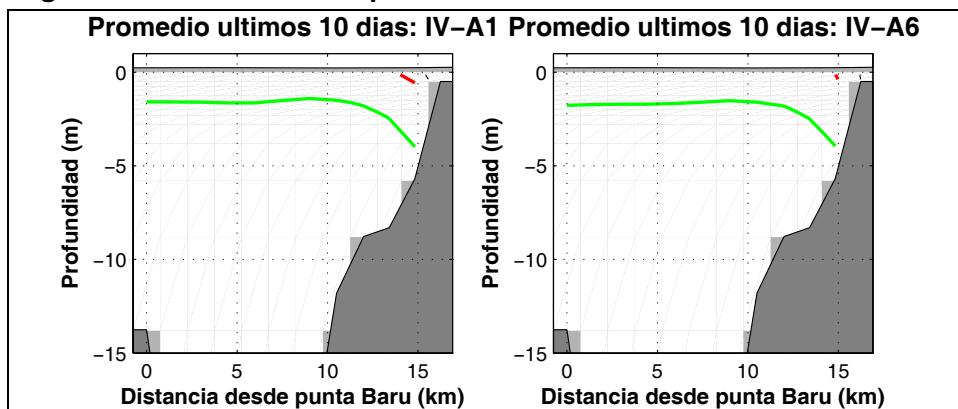
Para época climática III, correspondiente a caudales altos en los caños y vientos débiles con direcciones predominantes del noroeste, suroeste y sur, pero fluctuantes (Figura 5-28), la pluma de concentraciones medias se extiende sobre más allá de la entrada de la bahía, cubriendo una gran área hacia el sur (Figura 5-45). La concentración media del 1% no alcanza a las Islas del Rosario, pero se observa que la concentración media del 5% cubre toda la Bahía Barbacoas y se extiende también hacia el sur, siendo las alternativas A2 y A5 las que generan un mayor tamaño de la pluma, y las alternativas A3 y A4 las que muestran un menor tamaño.

Figura 5-41: Secuencia de la concentración de trazador y de la velocidad en superficie durante un ciclo diario en la época climática III, alternativa A1



Se destacan las concentraciones de 1% y 5% de la especificada en la salida de los caños. El recuadro muestra la magnitud y dirección del viento en cada instante.

Figura 5-42: Ubicación en profundidad de las líneas de concentración



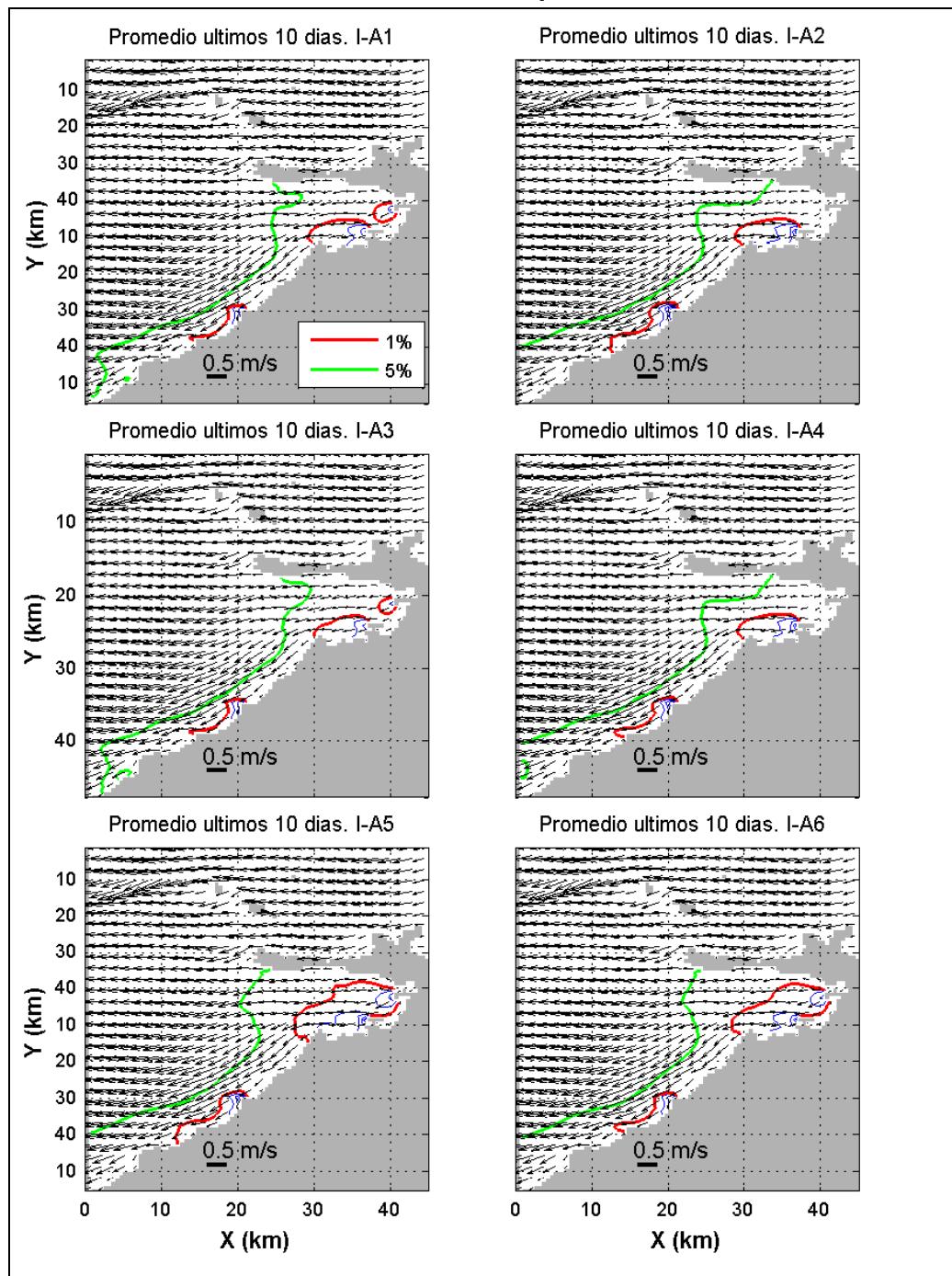
Ubicación en profundidad de las líneas de concentración media del 1%, (verde), y del 5%, (roja), obtenidas al promediar los resultados de los últimos diez días de simulación a lo largo de una sección transversal a la entrada de la bahía; época climática IV, alternativa 1, (no intervención del canal), y alternativa 6, (intervención con mayor impacto en Islas del Rosario).

Durante la época climática IV (Ver Figura 5-46), con menores caudales y con un régimen de vientos similar pero con mayor frecuencia de eventos provenientes del sur que la época III, (Ver Figura 5-29), se observa que la condición media de la pluma también se extiende más allá de los límites de la bahía, cubriendo una menor área que en la época III, pero ahora el extremo norte de la pluma se aproxima a las Islas del Rosario, especialmente en los Alternativas A2, A5 y A6.

Otro parámetro importante en el estudio de plumas fluviales es la velocidad de avance del frente, pues da una idea del tiempo disponible para que se lleven a cabo procesos fisicoquímicos, de difusión y de sedimentación. Como una manera indirecta de estimar la velocidad de avance del frente de la pluma en Bahía Barbacoas, se calculó el avance máximo que logró la pluma en las 36 horas siguientes al comienzo de inyección del trazador. En las Figura 5-47 a Figura 5-50 se muestra el avance de las plumas en términos de las concentraciones de 1% y 5% del valor especificado en las bocas de los caños, para las cuatro épocas climáticas y las seis alternativas. Los resultados confirman que durante las épocas III y IV, los frentes viajan más rápido que para las otras dos épocas climáticas. Al interpretar estas figuras en conjunto con las Figura 5-43 y Figura 5-44, se infiere que las plumas tienen poca probabilidad de llegar a las Islas del Rosario durante las épocas climáticas I y II. Adicionalmente, se observa que las alternativas A2, A5 y A6 siguen siendo algo más críticas que las demás, aunque en realidad las diferencias no son dramáticas.

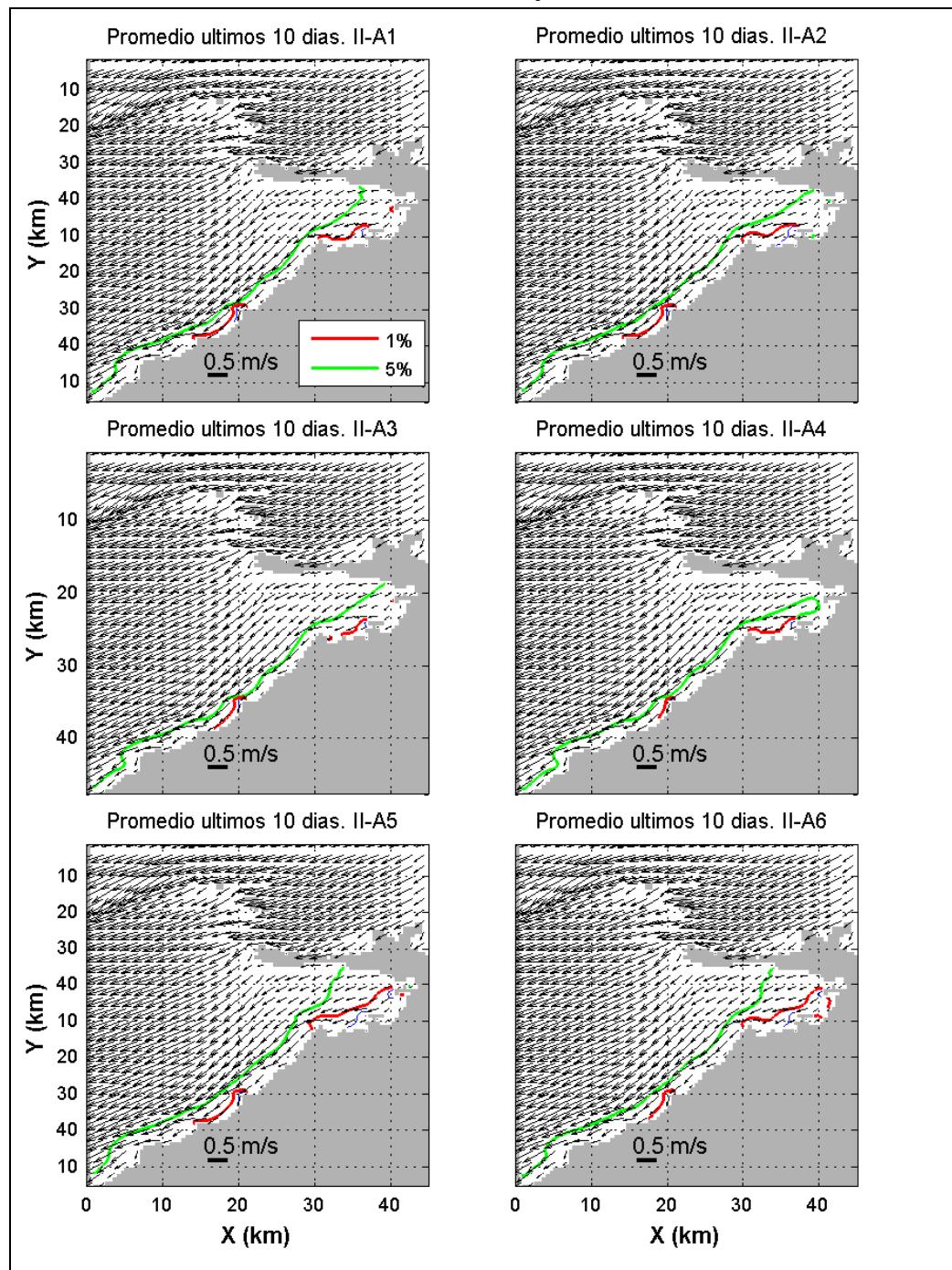
Del análisis anterior, se deduce que las épocas en donde el viento presenta una mayor variabilidad en su dirección con eventos esporádicos importantes (épocas III y IV) son las críticas en términos de cubrimiento de la pluma y avance hasta Islas del Rosario. En estas épocas climáticas, se destacan como más desfavorables las Alternativas A2, A5 y A6. En estos mismos términos, las alternativas A3 y A4 no representan cambios importantes con respecto a la Alternativa A1, condición actual.

Figura 5-43: Campo superficial de concentración de trazador y velocidad para las seis alternativas durante la época climática I



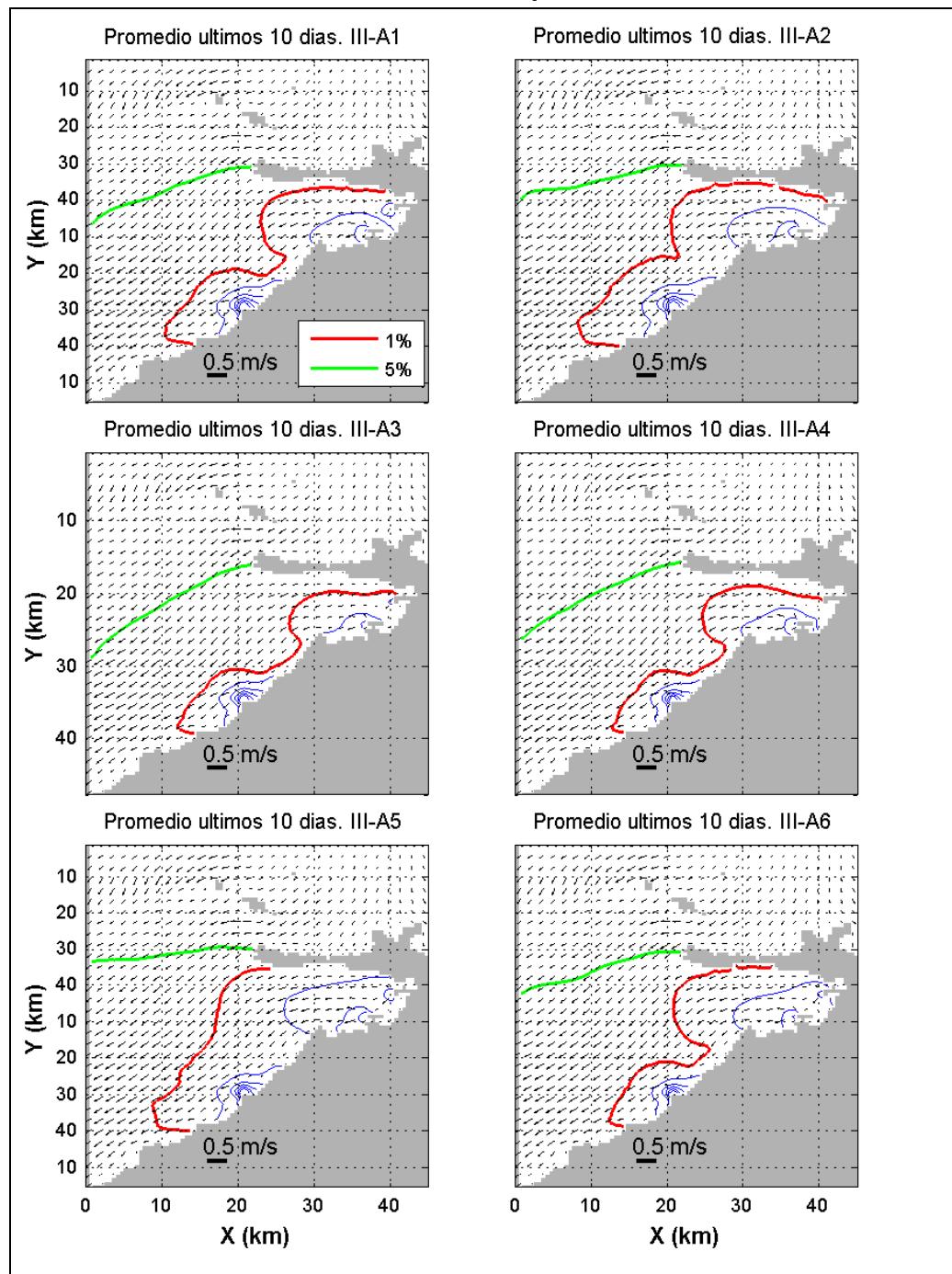
Se resaltan las concentraciones del 1% y del 5% del valor en las bocas de los caños.

Figura 5-44: Campo superficial de concentración de trazador y velocidad para las seis alternativas durante la época climática II



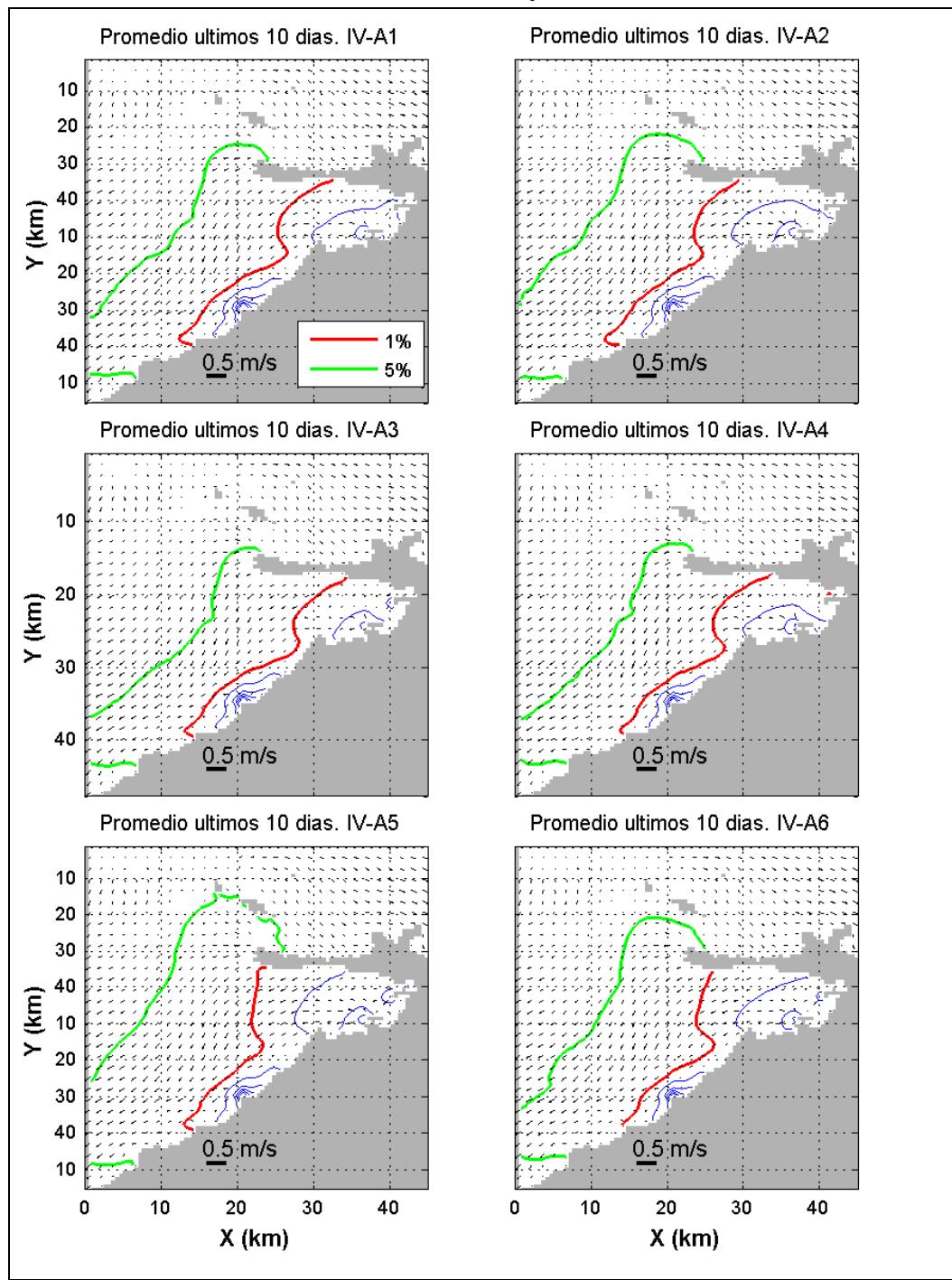
Se resaltan las concentraciones del 1% y del 5% del valor en las bocas de los caños.

Figura 5-45: Campo superficial de concentración de trazador y velocidad para las seis alternativas durante la época climática III



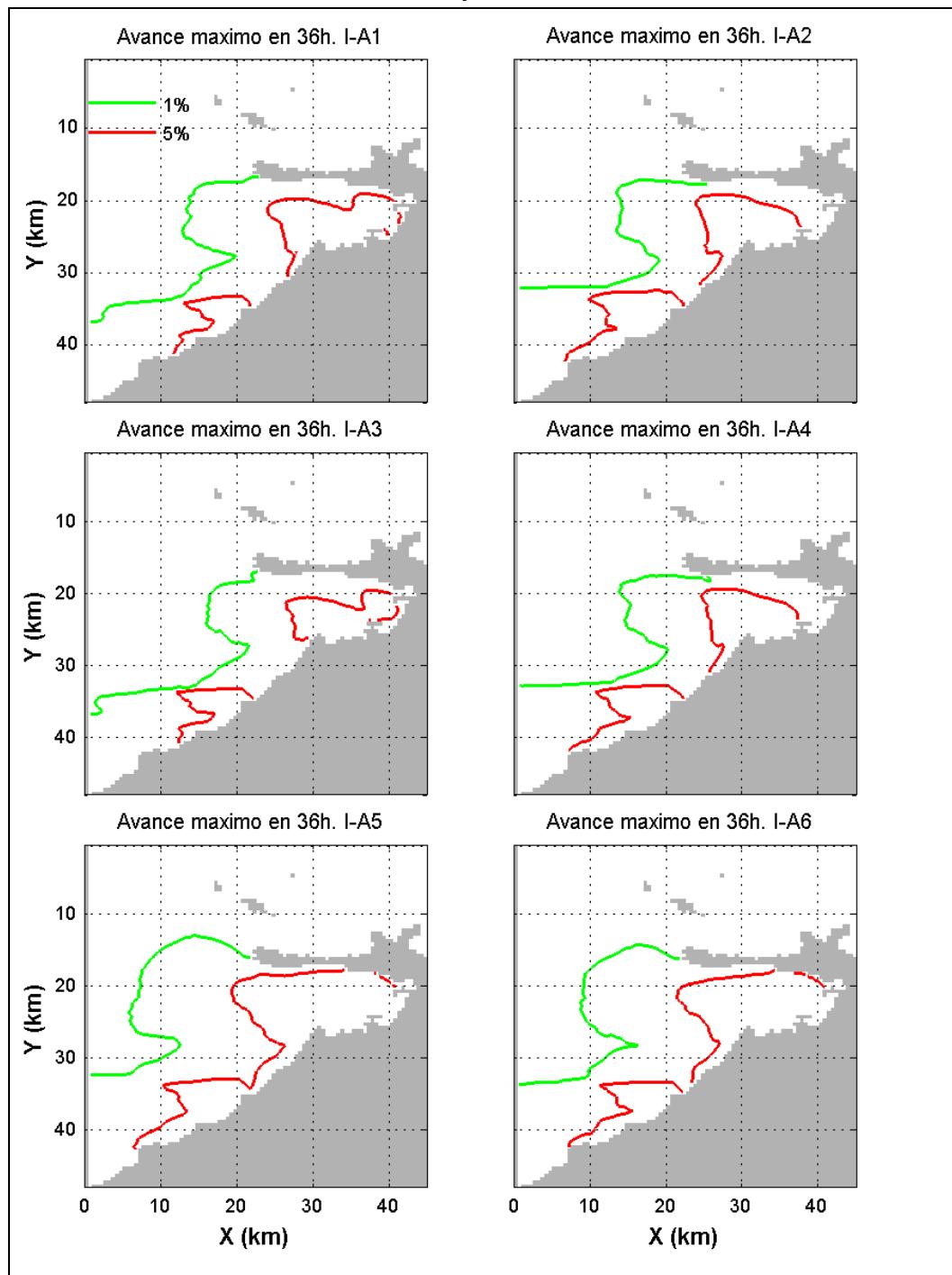
Se resaltan las concentraciones del 1% y del 5% del valor en las bocas de los caños.

Figura 5-46: Campo superficial de concentración de trazador y velocidad para las seis alternativas durante la época climática IV



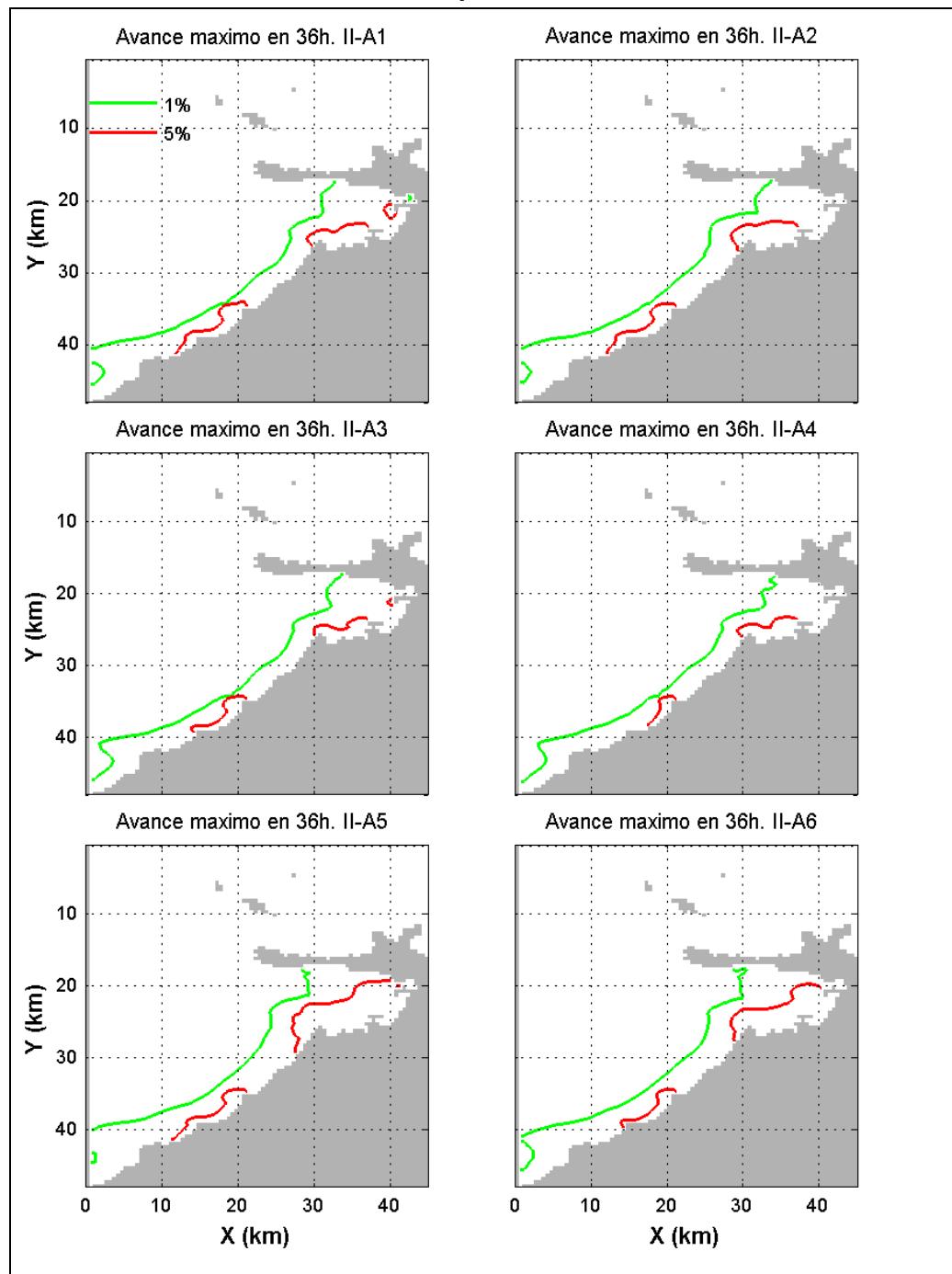
Se resaltan las concentraciones del 1% y del 5% del valor en las bocas de los caños.

Figura 5-47: Avance de la pluma superficial de trazador para las seis alternativas durante la época climática I



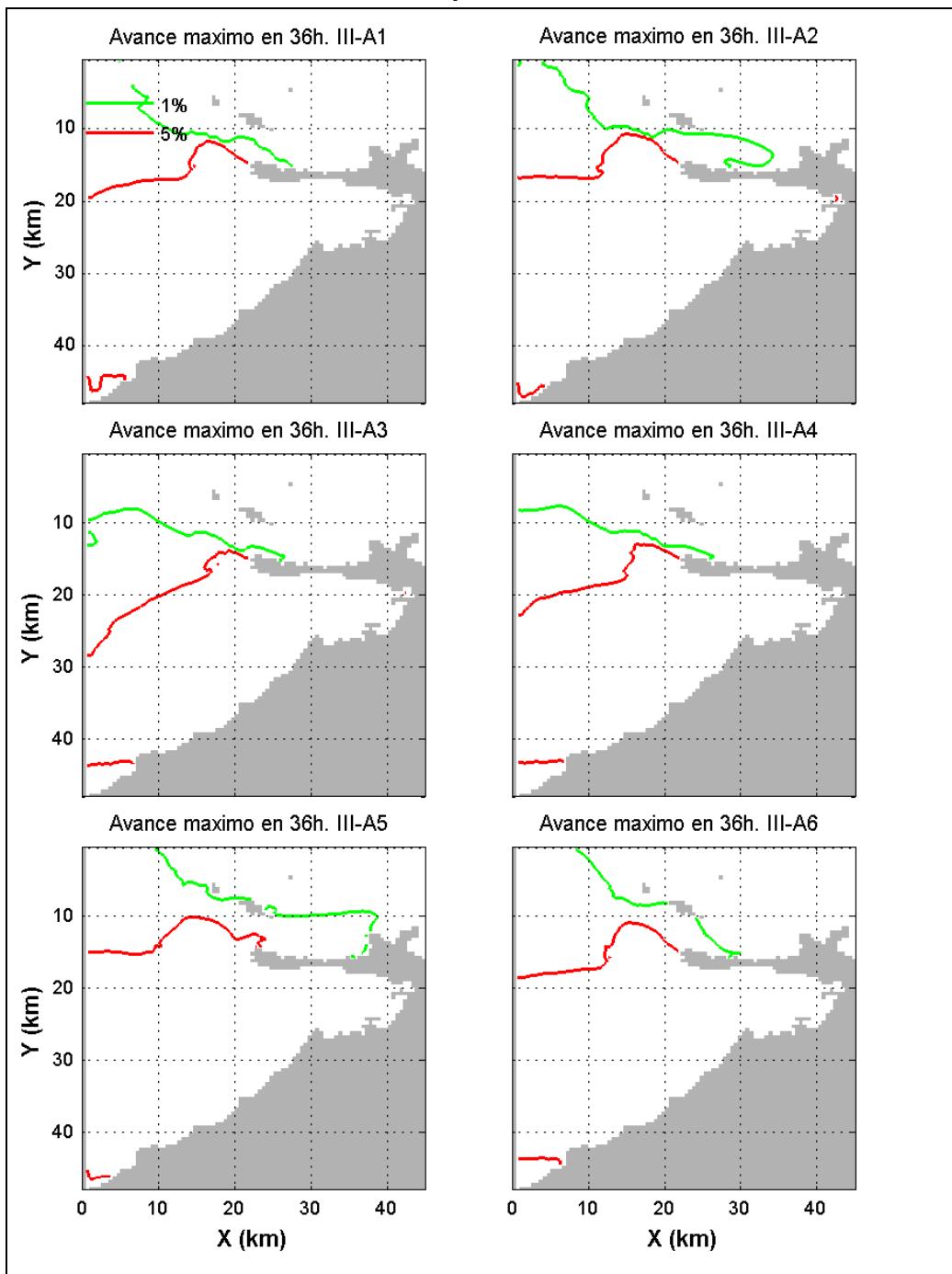
Se resaltan las concentraciones del 1% y del 5% del valor en las bocas de los caños

Figura 5-48: Avance de la pluma superficial de trazador para las seis alternativas durante la época climática II



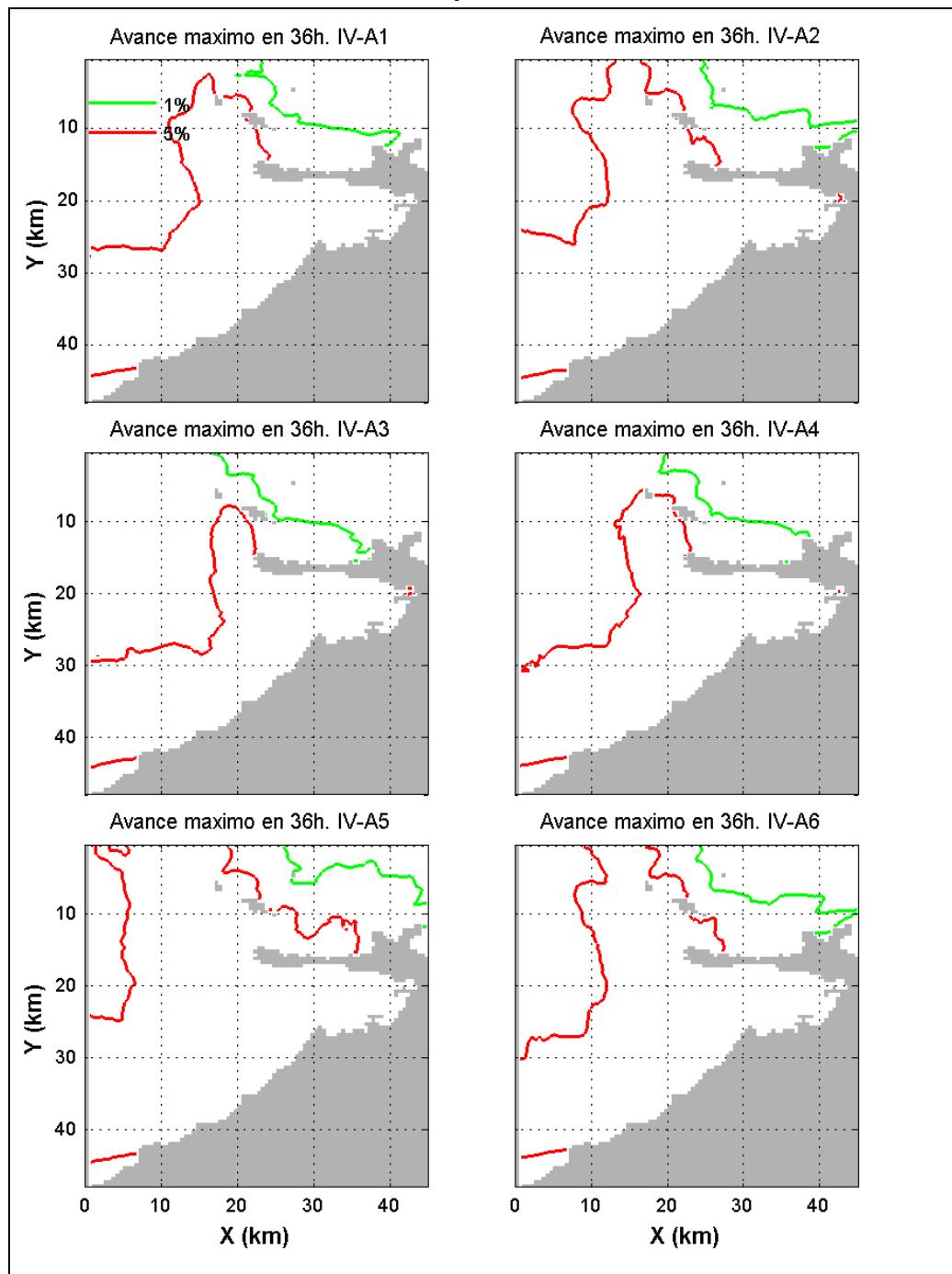
Se resaltan las concentraciones del 1% y del 5% del valor en las bocas de los caños

Figura 5-49: Avance de la pluma superficial de trazador para las seis alternativas durante la época climática III



Se resaltan las concentraciones del 1% y del 5% del valor en las bocas de los caños

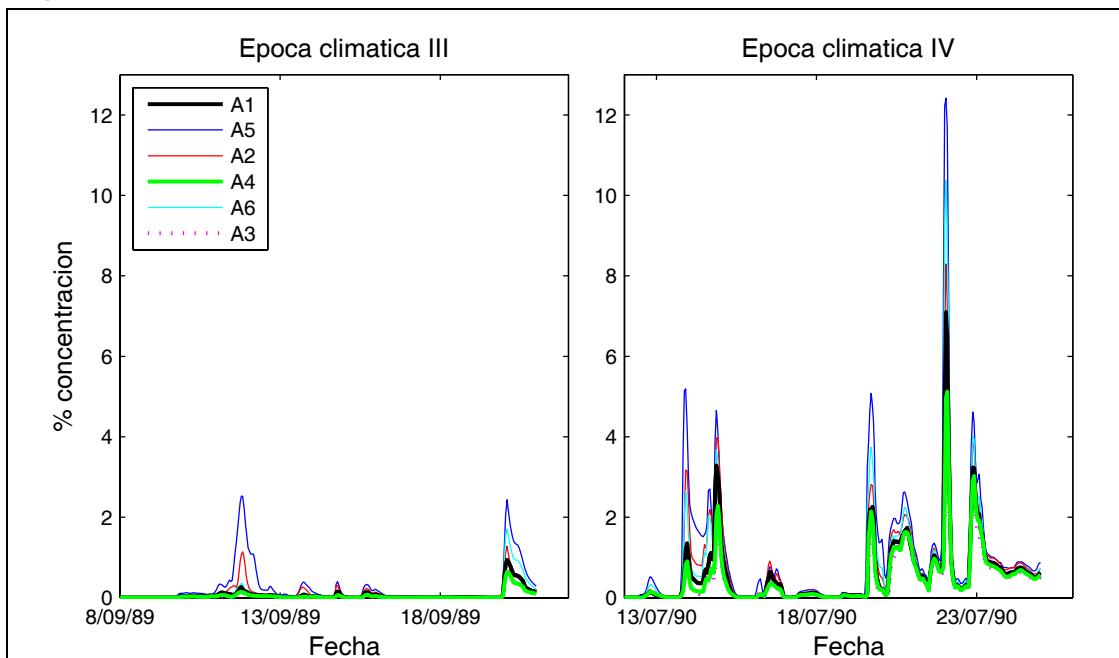
Figura 5-50: Avance de la pluma superficial de trazador para las seis alternativas durante la época climática IV



Se resaltan las concentraciones del 1% y del 5% del valor en las bocas de los caños

Dado que el desplazamiento de la pluma es un proceso cíclico, y que las mayores concentraciones de trazador llegan a las Islas del Rosario por pulsos, se hace necesario estudiar series de tiempo en un punto cercano a las Islas del Rosario. La Figura 5-51 muestra la variación de la concentración superficial de trazador en el “punto de control” mostrado en la Figura 5-18, para épocas climáticas III y IV y para todas las alternativas, resaltando las alternativas A1 (condición actual) y A4 (la que genera mejores condiciones en el Canal del Dique y su complejo cenagoso).

Figura 5-51: Concentración de trazador en un punto cerca de las Islas del Rosario



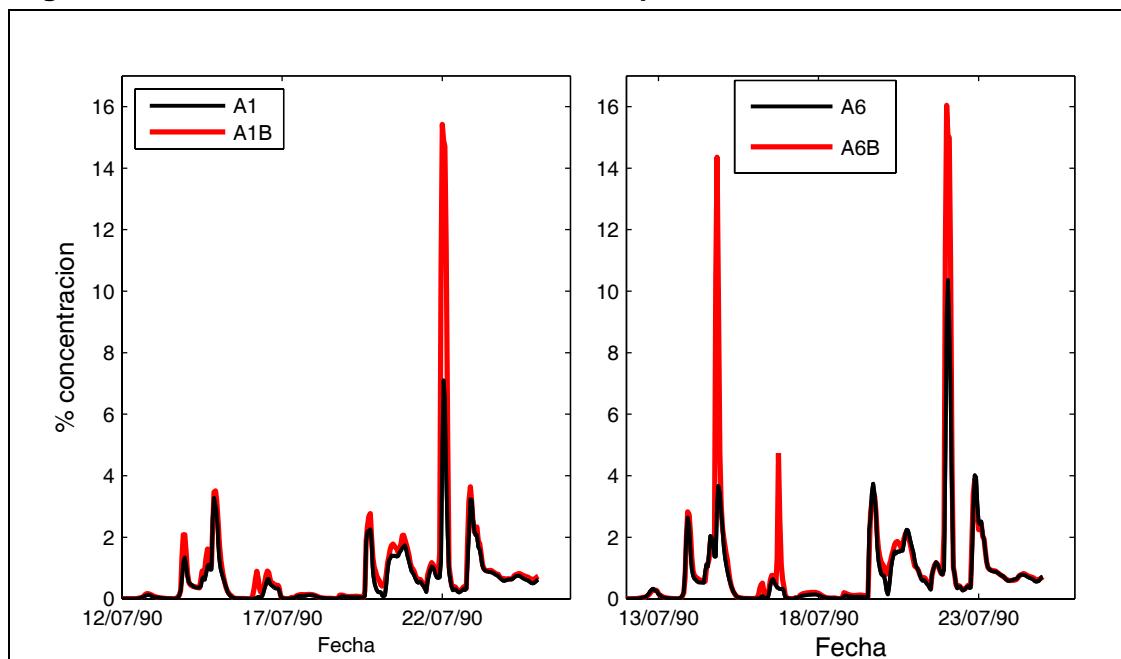
Se compara el efecto generado por las seis alternativas para las épocas climáticas III y IV.

En la Figura 5-51 se aprecia que las concentraciones durante la época climática III son menores que aquellas durante la época climática IV. Además, se observa que efectivamente las concentraciones altas se presentan como pulsos de corta duración. La alternativa A4 muestra una mejora con respecto a las condiciones actuales, mientras que A5 y A6 presentan concentraciones mayores.

Debido a que en ninguna de las simulaciones se observó que las plumas se movieran gracias a corrientes concentradas susceptibles de ser modificadas con obras perpendiculares de proporciones razonables, no se exploró el efecto que obras de este tipo generarían sobre las concentraciones de trazador en las Islas del Rosario. En cambio, se analizó el efecto que tendría cambiar el alineamiento de la boca de Matunilla con respecto a la configuración actual buscando orientar el flujo hacia la parte más interna de Bahía Barbacoas, de tal modo que se aumente el tiempo de viaje, (o recorrido) de la pluma de este caño. La Figura 5-52 muestra como esta modificación incrementa significativamente las concentraciones en las Islas del Rosario, para las alternativas A1 y A6. (usadas como ejemplo), durante la época climática IV. Esto parece deberse a que esta nueva configuración

mantiene una pluma con alta concentración de trazador en el interior de la bahía que es transportada como un pulso de alta concentración cuando los vientos cambian de dirección. Debe recalcarse aquí que las concentraciones calculadas son de un trazador inerte y neutralmente boyante. El sedimento real es susceptible a floculación con las sales disueltas en el agua del mar, proceso que debe intensificarse al enfrentar las plumas de los caños Lequerica y Matunilla y que favorece su sedimentación.

Figura 5-52: Concentración de trazador en un punto cerca de las Islas del Rosario



Se compara el efecto generado por una modificación hipotética de la orientación de la boca del caño Matunilla en las alternativas A1 y A6 para la época climática IV.

6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS

6.1. ALCANCE GENERAL DE LOS TRABAJOS

En este informe se han presentado las actividades de modelación matemática hidráulica y de calidad del agua del Canal del Dique y de su sistema lagunar para diferentes alternativas de disminución del caudal y el control de sedimentos de entrada a la Bahía de Cartagena. También se han ilustrado resultados de la cuantificación de impactos ambientales en las condiciones actuales y bajo las diferentes alternativas de manejo hidrosedimentológico, que la detallada herramienta computacional implementada ha permitido calcular.

Al igual que en el proyecto CORMAGDALENA-UNAL (2007), los trabajos de modelación matemática del Canal del Dique y su sistema lagunar han permitido generar curvas de duración o excedencias de las 28 variables hidráulicas y de calidad del agua en 68 sitios relevantes del sistema y 11 ciénagas, que permiten la caracterización de impactos y efectos de seis alternativas de manejo hidrosedimentológico de disminución de caudal y el control del flujo de sedimentos hacia la Bahía de Cartagena. Los resultados han permitido identificar problemas de disponibilidad del agua para riego y para consumo humano con la actual infraestructura física de captación y distribución por reducción de la profundidad de los cuerpos de agua; estimar la profundidad de agua en las ciénagas; calcular la calidad bacteriológica, biológica y físico-química del agua en todo el sistema, con el fin de evaluar los efectos ambientales en cuerpos de agua, en términos de los conflictos uso-calidad del agua que se generan y los impactos en el estado limnológico de los cuerpos de agua dulce, así como cuantificar el efecto de reducción de carga de sedimentos en suspensión de las alternativas de disminución de caudal y control del flujo de sedimentos estudiadas.

Los resultados del proceso de simulación presentados en este informe han permitido por lo tanto apoyar la evaluación de la factibilidad técnica de las alternativas de disminución de caudal mediante la construcción de angostamientos localizados de la sección transversal del Canal del Dique y la construcción de una compuerta-esclusa aguas abajo en el sector del Recreo, la esclusa de Paricuica. El análisis de factibilidad completo considera factores adicionales tratados y resumidos en otros informes del presente proyecto, tales como el efecto de la reducción de la sección en la navegación, el impacto de la salinización del sistema de Pasacaballos al RK 104 o 110, los impactos en la zona costera de la bahía de Barbacoas, entre otros.

En el Capítulo 3 de este informe se presentan resultados específicos de cuantificación de los efectos hidráulicos, de la reducción de carga de sólidos suspendidos vertida al mar, del estado limnológico de las ciénagas, y del potencial del avance de la cuña salina por los canales, que diferentes combinaciones de obras y alternativas de manejo hidrosedimentológico generan. Las principales conclusiones de estos ejercicios de cuantificación se resumen a continuación.

6.2. CARACTERÍSTICAS DE LA ALTERNATIVA SELECCIONADA

Considerando los factores hidráulicos, sedimentológicos, de calidad del agua, de desarrollo de la cuña salina y limnológicos en las ciénagas del sistema lagunar, se considera que la mejor alternativa para la disminución del caudal y el aporte de sedimentos a la Bahía de Cartagena es la alternativa 4 definida en este estudio. Esta consiste en la optimización de los canales de interconexión ciénaga-canal, la construcción de angostamientos de la sección transversal en tres sectores del Canal, y la construcción simultánea de la compuerta-esclusa en el sector del Recreo en el kilómetro 104 del Canal.

El efecto combinado de las contracciones o angostamientos, mejora de las interconexiones ciénaga-canal y la construcción de la compuerta-esclusa, es reducir el caudal en el sistema en 27% con respecto a la condición actual de referencia manteniendo niveles de agua altos en las interconexiones ciénaga-canal sin que se afecten, por lo tanto, los intercambios de agua y de nutrientes necesarios para mantener adecuadas condiciones limnológicas en las ciénagas del sistema. Finalmente se controla la totalidad, (100%), de la carga de los sedimentos en suspensión que llega en las condiciones actuales a la Bahía de Cartagena. Incluso, por la reducción del caudal, se mantiene o reduce la carga de sólidos suspendidos a la bahía de Barbacoas con respecto a las condiciones actuales por lo cual no se esperan impactos mayores a los que puedan presentarse en la actualidad en el PNN Islas del Rosario. Este aspecto se analiza en detalle en la modelación de la zona marina.

Los efectos hidráulicos de la alternativa 4 se consideran positivos también en otros aspectos; si bien se reducen un poco los desbordes laterales en las ciénagas de la zona de aguas arriba del sistema, se mantienen altos flujos de intercambio en las mismas evitando la afectación de su estado limnológico. Al disminuir los desbordes en la zona alta, disminuyen también los impactos de inundaciones en las poblaciones ribereñas del Canal y de las ciénagas en esta zona. Dado que no se reduce sustancialmente la profundidad en las ciénagas, no se generan problemas de bombeo en las estaciones de Mahates, Evitar, Juan Gómez y otras; por otro lado, se controla la longitud de la cuña salina que se desarrolla para caudales bajos en el RK 104 manteniendo suficiente agua dulce hasta la compuerta-esclusa. Los resultados indican por lo tanto que para ningún caudal se presentaría potencial intercambio de agua salada con la ciénaga de Palotal, y menos intercambio de agua salada con la ciénaga de Juan Gómez, aguas arriba del RK 104. La subienda de peces por el río Magdalena tampoco se verá afectada, por estar localizada la compuerta-esclusa aguas abajo en el sector del Recreo.

De acuerdo con los resultados de la carga de sólidos suspendidos, en Pasacaballos y el caño Lequerica, puede esperarse una reducción máxima de carga de sedimentos en suspensión del 100%. Incluso, algo muy importante es que se estima una disminución del 8 % de la carga de SST en el caño Matunilla mediante la construcción de la compuerta-esclusa en el RK 104, alternativa 4. Esta última condición es posible, ya que la reducción del caudal en Calamar del 27% generada por el primer angostamiento es considerable.

La carga de nutrientes y materia orgánica, clorofila y otros determinantes, vertidos al mar en la alternativa 4, tampoco aumenta con respecto a las condiciones actuales debido al menor caudal y mayor tiempo de retención hidráulica en el sistema. Sin embargo, la variación de la

calidad del agua generada por la alternativa a lo largo del Canal del Dique es, relativamente, baja y no se prevén afectaciones que requieran modificación respecto de los estándares de calidad del agua, o restricciones a su uso.

Se ha identificado adicionalmente, que se mejoran las condiciones limnológicas de nueve ciénagas del sistema lagunar con respecto a las condiciones actuales al aumentar la cantidad de agua de intercambio en los canales de conexión ciénaga – Canal, (ver también CORMAGDALENA-UNAL, 2007b). Esto se ha logrado mediante un mayor ancho W del canal de interconexión y una menor altura de paramento P_{ci} , (dragado del canal). Por lo tanto parte integral de la alternativa 4 es la optimización de las interacciones ciénaga-canal.

A partir de los resultados obtenidos mediante la herramienta matemática integrada de todo el sistema no se recomienda construir únicamente los angostamientos de la sección transversal, (alternativa 3). Si bien esta alternativa por sí sola produce una disminución importante del 27% del caudal, que se traduce en una reducción del 32% de la carga de SST que alcanza la bahía de Cartagena, la alternativa genera problemas en el estado limnológico en las ciénagas por disminución de los flujos de intercambio y los desbordes laterales; se requiere el efecto combinado de la compuerta-esclusa y los angostamientos en la zona intermedia del canal para el mantenimiento de niveles de agua altos.

Tampoco se recomienda la sola construcción de la esclusa - compuerta del kilómetro RK 104 (alternativa 2) o de la esclusa - compuerta del RK 110, (alternativa 5), ya que es necesaria la reducción de caudal en el sistema producida por el primer angostamiento. Estas alternativas generan el efecto potencial, al igual que la alternativa 6, de incrementar sustancialmente los caudales y carga sólida por los caños Correa, Matunilla y Lequerica hacia la Bahía de Barbacoas. Esto a su vez genera, comparativamente, por lo tanto mayores impactos potenciales negativos en las Islas del Rosario como se demuestra en los análisis de la modelación de la zona marina.

6.3. RESULTADOS Y LIMITACIONES DE LA MODELACIÓN MARINA

El presente estudio presenta varias limitaciones que condicionan las conclusiones sobre los resultados presentados, sin invalidarlos. Estas limitaciones se generan principalmente por el corto período establecido para la realización del estudio y se describen a continuación:

- El uso de un trazador para identificar patrones de transporte horizontal permite estimar el camino a lo largo del cual el material suspendido es susceptible de sedimentarse pero no permite evaluar el proceso de sedimentación. Un estudio del proceso de sedimentación requiere mediciones específicas y calibración rigurosa de los parámetros que gobiernan este proceso que resulta compleja por el proceso de floculación de los sedimentos finos con las sales disueltas en el agua de mar.
- Para la aplicación de un modelo de simulación hidrodinámica, se requiere realizar una validación del proceso de calibración con un conjunto de datos independiente. Este proceso no pudo realizarse para este estudio debido a que no hubo oportunidad para realizar una segunda campaña de campo en una época climática diferente a la utilizada

para la calibración. No obstante, se tiene alguna tranquilidad al respecto, debido a que el modelo empleado ha sido utilizado ampliamente en situaciones similares.

- La discretización espacial seleccionada se obtuvo como un compromiso entre precisión obtenida en los resultados y tiempo de simulación de cada simulación. A pesar de que la discretización es adecuada para simular las características del flujo lejos de las bocas de los caños, evaluar en detalle el comportamiento de las plumas y los sedimentos al salir de cada caño exige una malla más fina es cercanías de esas bocas. Dicha malla fina fue construida pero su implementación implicaba tiempos de simulación de unas 20 horas por cada simulación y esto hizo imposible su utilización para evaluar tantas alternativas.
- Alguna información directa no estuvo disponible de una manera ágil y la medición de algunas variables requería realizar un proceso de compra de equipo especializado.
- Inicialmente, se seleccionaron las épocas de interés para el estudio como las épocas en las que se tenían valores máximos de caudales o de velocidad de vientos debido a que son los agentes generadores de flujos advectivos, y la época de condiciones que más predominara en el tiempo. Sin embargo, las simulaciones muestran que las épocas con variabilidad en la dirección de los vientos son importantes y obliga a explorar otras épocas climáticas no consideradas hasta el momento.

A pesar de estas limitaciones, los resultados de las simulaciones son bastante buenos para la mayor parte de la Bahía, como se observa de la buena calibración obtenida. No se detalla la propagación de la pluma en cercanías de las bocas, pero si se hace una buena representación de la propagación de la pluma una vez ha experimentado la difusión inicial. Es especialmente valiosa la adecuada representación en el modelo del espesor de la capa superficial sobre la cual se distribuye el momentum impartido por el viento.

Las épocas críticas para el avance de la pluma hasta las Islas del Rosario son aquellas en las cuales la dirección de los vientos fluctúa. La situación se agrava si el caudal proveniente de los caños es alto. Las épocas de vientos fuertes nos son críticas debido a que el viento sopla constantemente hacia el suroeste, alejando la pluma de las Islas del Rosario.

Los resultados de este ejercicio exploratorio no son conclusivos en términos cuantitativos. Sin embargo, la comparación de alternativas realizada si permite evaluar cualitativamente la que menos impacto genera. Las concentraciones de trazador estimadas en las Islas del Rosario para las alternativas estudiadas indican que alternativas como la A3 y la A4 sugieren concentraciones menores que aquellas para las condiciones actuales. Alternativas como la A2, A5 y A6 generan eventos con un aumento importante de las concentraciones con respecto a las condiciones actuales. Sin embargo, la forma de la pluma no muestra cambios significativos entre las alternativas. Las concentraciones reportadas en este informe solo sirven para dar una idea inicial de cómo la modificación de caudales modifica los patrones de transporte horizontal. Para una estimación de concentración de sedimentos más adecuada, se requiere incorporar en la modelación el proceso de floculación y sedimentación.

No se identifican corrientes concentradas que sirvan como medio de propagación de la pluma, si no que la pluma presenta un frente ancho que se extiende por varios kilómetros.

Debido a esto, no parece que la construcción de obras modificadoras de los patrones de circulación y de tamaños razonables tenga un impacto importante sobre el transporte de sustancias hacia Islas del Rosario.

Dada que la resolución espacial utilizada en este estudio no es lo suficientemente fina para lograr una buena precisión en el campo cercano a las bocas de los caños, se recomienda un análisis con una malla refinada en estas zonas.

Los resultados del ejercicio de reorientación de la boca del caño Matunilla no son conclusivos pero si alertan sobre la complejidad del fenómeno y de lo cuidadoso que debe ser un estudio para determinar el impacto real de obras civiles. Inicialmente pensamos que esta modificación generaría una disminución en las concentraciones simuladas en Las Islas del Rosario como resultado de un mayor tiempo de viaje. Sin embargo, los resultados del modelo mostraron que el efecto generado es el contrario debido a la generación de manchas de alta concentración que son transportadas en forma pulsante hacia las islas. Es importante anotar que este resultado obtenido no considera el efecto de los procesos de floculación y sedimentación, procesos que pueden incrementarse al redireccionar la boca, por lo que una buena estimación de la concentración final requiere la incorporación de estos procesos.

Finalmente, se sugiere la realización de un estudio más detallado tomando en cuenta las consideraciones expresadas en los párrafos anteriores, que permita estimar adecuadamente concentraciones de sedimentos y de otras especies que afectan la calidad del agua, a fin de detallar las condiciones de manejo de los sedimentos que ingresan a la Bahía de Barbacoas. Ese estudio debe contar también con la participación de personal capacitado en ecología acuática para evaluar el significado de las concentraciones esperadas en las Islas de Rosario y para determinar las condiciones de ordenamiento de los depósitos en la bahía a fin de mejorar el crecimiento de manglares en la zona como medida de compensación por los efectos ambientales que se vienen produciendo.

7. COSTOS DE LA ALTERNATIVA

7.1. GENERALIDADES

De manera integral, la nueva alternativa implicaría las siguientes acciones:

- Construcción mediante relleno seleccionado de tres estrechamientos para reducir caudales manteniendo los niveles
- Construcción de diques de control de inundaciones en la parte baja del Canal.
- Construcción de una esclusa y compuerta en el estrecho de Paricuica
- Desvío del caudal a través de los caños Correa y Matunilla hacia la Bahía de Barbacoas.
- Optimización de los dragados al inicio y final del canal
- Mejoramiento de las conexiones canal-ciénagas
- Fortalecimiento del ejercicio de la autoridad ambiental en la ecorregión

Los costos generales de estas acciones han sido investigados sumariamente y se presentan a continuación. Como se puede observar el costo más alto es el de los rellenos clasificados para lograr los angostamientos, razón por la cual es necesario optimizar el diseño de esos angostamientos. La Tabla 7-1 muestra como el volumen de relleno se puede reducir en una proporción bastante grande con la selección adecuada del talud de las orillas, el cual aparentemente no es muy crítico desde el punto de vista hidráulico. El Laboratorio ha utilizado para efectos de diseño hidráulico un talud 1:1, dado que este sería el más crítico desde el punto de vista de sus efectos hidráulicos, pero todo parece indicar que un talud de 1.5:1 o de 2:1 podrá ser utilizado en el diseño final con un ahorro importante de dinero.

Tabla 7-1: Volumen total de material requerido para conformar los angostamientos

Talud (Km)	Volumen Dragado (m ³)	Volumen Relleno (m ³)
1.0H:1.0V	377,411	4'964,179
1.5H:1.0V	216,489	4'199,017
2.0H:1.0V	216,489	3'859,128

El costo de la esclusa de Paricuica no ha sido calculado directamente dado que en el corto tiempo de la investigación no fue posible realizar prediseños adecuados; por esta razón se

ha utilizado el costo preliminar dado por la Empresa CNR de Francia, que parece enteramente adecuado al presente nivel de análisis.

7.2. COSTO DE RELLENOS SELECCIONADOS

Los estrechamientos serán obtenidos con base en rellenos logrados con material granular de dos características. La primera capa, más gruesa se realizará con el llamado “Ripio de Cantera”, y es el equivalente, en material granular a un “material común”; este material se espera conseguir a un precio reducido de unos 32,000 pesos/m³, de acuerdo con la investigación realizada en las canteras vecinas; la segunda capa, en contacto con el flujo y separada de la anterior por un filtro geotextil no-tejido, para evitar fugas de material fino, se calculó como el 25% del volumen total y deberá tener un D50 de 35 cm, con D90 de 50cm y D10 de hasta 15cm; su costo será seguramente de alrededor de \$60,000/m³, estos costos estipulan un transporte promedio desde las canteras de 35 Km.

Tabla 7-2: Costo de Rellenos Seleccionados para los angostamientos con Talud 1:1

Descripción	Unidad	Cantidad	V. Unitario (\$US)	Valor total (\$US)
Piedra para enrocado (Incluye cargue, descargue y transporte)	M ³	1'241,045	25.71	31'907,267
Material granular para relleno (Incluye cargue, descargue y transporte)	M ³	3'723,134	13.71	51'04,4167
TOTAL				82'951,434

Tabla 7-3: Costo de Rellenos Seleccionados para los angostamientos con Talud 1.5:1

Descripción	Unidad	Cantidad	V. Unitario (\$US)	Valor total (\$US)
Piedra para enrocado (Incluye cargue, descargue y transporte)	M ³	1'049,754	25.71	26'991284
Material granular para relleno (Incluye cargue, descargue y transporte)	M ³	3'149,263	13.71	43'186068
TOTAL				70'177.351

Tabla 7-4: Costo de Rellenos Seleccionados para los angostamientos con Talud 2:1

Descripción	Unidad	Cantidad	V. Unitario (\$US)	Valor total (\$US)
Piedra para enrocado (Incluye cargue, descargue y transporte)	M ³	964,782	25.71	24'806,483
Material granular para relleno (Incluye cargue, descargue y transporte)	M ³	2'894,346	13.71	39'690,373
TOTAL				64'496,855

Tabla 7-5: Costo de dragados con Talud 1:1

Descripción	Unidad	Cantidad	V. Unitario (\$US)	Valor total (\$US)
Relleno hidráulico (sin incluir puesta en la zona de la draga)	M ³	377,411	2.83	1'068,073
TOTAL				1'068,073

Tabla 7-6: Costo de dragados con Taludes 1.5:1 y 2:1

Descripción	Unidad	Cantidad	V. Unitario (\$US)	Valor total (\$US)
Relleno hidráulico (sin incluir puesta en la zona de la draga)	M ³	216.489	2.83	612,300
TOTAL				612,300

El costo se hizo considerando el precio del dólar del 09 de diciembre de 2008 a \$2333.54.

7.3. COSTO DE DIQUES DE CONTROL DE INUNDACIONES

Dado que la esclusa de Paricuica producirá aumentos de nivel moderados en el sector entre el K104, sitio de emplazamiento de la esclusa, y el K80 aproximadamente, sitio de santa Helena 1, será necesaria la construcción de diques, cuyo volumen se ha estimado en 165.600 de m³, y que tendrán un costo aproximado de \$25,000/m³. (10.71 \$US)

Tabla 7-7: Costo de diques de control de inundaciones

Descripción	Unidad	Cantidad	V. Unitario (\$US)	Valor total (\$US)
Material de relleno	M ³	165.607	10.71	1.774.204
TOTAL				1.774.204

7.4. COSTO DE LA ESCLUSA DE PARICUICA

El costo de la esclusa estimado por los ingenieros de la Empresa CNR es de veinticinco millones de dólares, que se deben agregar al costo general de la obra.

7.5. COSTO DE LAS ADECUACIONES A REALIZAR EN LOS CAÑOS DE CONEXIÓN

Las obras completas para el mejoramiento de los caños de conexión no han sido totalmente prediseñadas, dado que hasta el último momento se ha trabajado en las condiciones hidráulicas de la alternativa. Estos prediseños deberán realizarse durante la elaboración de los prepliegos, en la siguiente etapa de análisis, a fin de especificar exactamente todas las obras a realizar por los contratistas del proyecto. Los costos de estas adecuaciones se han establecido preliminarmente en 15 millones de dólares y consisten solamente en dragados y movimientos de tierra necesarios para ensanchar y uniformizar las secciones transversales y pendientes de estos caños y colocar estructuras simples de compuertas donde se requiera.

7.6. OTROS COSTOS DEL PROYECTO

Para llegar a un total de costos de construcción, operación y mantenimiento, es necesario contar con los costos de operación y mantenimiento, para lo cual se requiere especificar detalladamente estos costos, lo cual se debe hacer en la siguiente etapa del proyecto. Los costos operativos dependerán del análisis que se haga de las necesidades de control de la navegación, pero pueden incluir en general dos estaciones de control, una en Calamar y otra en El recreo, cerca del sitio de la esclusa, a fin de regular la navegación en todo el Canal; se supone que no será necesario operar los caños de conexión de las ciénagas, pero de todas maneras se considera necesario disponer de instalaciones y fondos operativos para el control ambiental que deberá ejercer la Autoridad correspondiente y la fuerza pública que necesariamente deberá acompañar la acción de la Autoridad. Estos costos no se cotizan en el momento dado que no influyen en los costos de construcción, pero deben ser especificados dado que son fondos indispensables para el adecuado funcionamiento del proyecto.

7.7. COSTO TOTAL DEL PROYECTO

De acuerdo con los anteriores precios, el costo total de la alternativa, considerando taludes 2:1 y sin tener en cuenta los costos de operación y mantenimiento será de:

Rellenos	US\$ 65
Dragados	US\$ 1
Diques	US\$ 2
Compuerta	US\$ 25
Interconexiones	US\$ 15
TOTAL	US\$ 108

Considerando el costo de acciones compensatorias, como las que se podrían realizar en la Bahía de barbacoas para mejorar las condiciones de deposición de materiales y la siembra de manglares, así como otras medidas del plan de Manejo Hidrosedimentológico y Ambiental del proyecto, así como imprevistos, se estima que el costo total de la alternativa puede llegar a los ciento veinticinco millones de dólares, US\$ 125.

8. VALORACIÓN CUALITATIVA DE IMPACTOS AMBIENTALES

Para cumplir con la Resolución 0249/04 del MMA (MAVDT), los estudios e investigaciones adelantadas por la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, se orientaron a definir y evaluar una alternativa de manejo sedimentológico para el Canal del Dique, que además de minimizar el aporte de sedimentos a la Bahía de Cartagena, garantizara:

1. La navegabilidad del canal.
2. El suministro de agua para el consumo humano y para los distritos de riego existentes y proyectados.
3. La prevención y mitigación de impactos ambientales sobre las actividades de pesca, agricultura, ganadería y sobre la vida de los pobladores.
4. El soporte ambiental de las especies y ecosistemas existentes.

Estudios previos realizados por UniNorte (2002) recomendaban la realización de una alternativa (Alternativa IV) basada en control de caudales, esto es, en el principio de que disminuyendo el caudal se disminuyen los sedimentos. Consistía en la construcción de una esclusa a la entrada en Calamar, pero garantizando el acceso de agua (caudal ecológico) a través del Caño Viejo mediante el cierre del brazo izquierdo de la isla Becerra. En desarrollo de los estudios por parte de la UN comenzaron a aparecer dudas sobre la pertinencia y eficiencia de esta alternativa, dudas que fueron corroboradas con las modelaciones realizadas y cuyos resultados mostraron que un funcionamiento inadecuado ya que la entrada del canal navegable se sedimentaba con materiales gruesos que impedirían la entrada de barcos a la esclusa. Se pudo comprobar igualmente que el flujo de retorno por el brazo izquierdo de la isla Becerra tenía una velocidad muy reducida, lo que ocasionaría su rápida sedimentación por deposición de materiales finos, además de la probable desestabilización de la morfología del río Magdalena aguas arriba y abajo de Calamar.

En consecuencia, de común acuerdo con Cormagdalena, se determinó descartar la alternativa de Uninorte (alternativa IV) y se procedió a plantear y definir para su evaluación preliminar las siguientes alternativas: Alt0. Condición Actual; Alt2. Condición Actual Mejorada; Alt3. Condición Actual Mejorada + Esclusor en Calamar; Alt4. Control de Caudal y Sedimentos mediante Compuerta y Exclusa en Calamar.

Como resultados de esta evaluación preliminar se pudo evidenciar que las condiciones de operación actual son nocivas para el medio ambiente y particularmente para su población. Así mismo, se pudo concluir que aunque las alternativas consideradas involucraban bondades y mejoramientos netos importantes para el medio ambiente, ninguna podría ser óptima si no se contaba con una presencia efectiva por parte del Estado en la ecorregión. Adicionalmente, con base en los resultados de esta evaluación preliminar y tomando en

consideración los principios de precaución, gradualidad, economía y mejoramiento continuo, se hicieron las siguientes recomendaciones generales:

- Implementar y desarrollar de manera inmediata la alternativa de Condición Actual Mejorada, toda vez que es urgente y común a las demás alternativas consideradas. La condición actual mejorada representa un mejoramiento significativo sin grandes inversiones y de paso permite continuar con el estudio de las otras alternativas consideradas, y profundizar en la evaluación de elementos adicionales de la solución.
- Continuar con el estudio de otras alternativas consideradas y profundizar en la evaluación de elementos adicionales de la solución, mediante un proceso in-situ de experimentación e investigación, que permita el monitoreo, seguimiento y evaluación de la condición actual mejorada y por supuesto, su complementación posterior con otro tipo acciones que deberán continuar siendo objeto de evaluación y estudio.
- Cualquier alternativa que se seleccione deberá tener un alto grado de reversibilidad, que pueda ser desmontada fácilmente y a un costo mínimo, si con el tiempo no cumpliera con las expectativas de eficacia y eficiencia requeridas. Así mismo, deberá ser objeto de una Evaluación de Impacto Ambiental que garantice la prevención, eliminación, mitigación y/o control de los impactos que genere, todo ello mediante la formulación e implementación del respectivo Plan de Manejo Ambiental.

Luego de un breve receso de aproximadamente 6 meses en el desarrollo del Convenio Interadministrativo, CORMAGDALENA encomendó a la Universidad Nacional continuar con los estudios e investigaciones, involucrando nuevas alternativas que consideren la disminución de caudales mediante estrechamientos en diferentes sectores del Canal y la construcción de un sistema de esclusa-compuerta en el estrecho de Paricuica.

Bajo estas nuevas consideraciones, se realizan dos nuevos procesos evaluativos: el primero, denominado “evaluación cualitativa detallada”, en el cual se evalúan de manera independiente las acciones de las cuatro alternativas preliminares consideradas y se agrega una quinta alternativa que involucra la condición actual mejorada + 3 estrechamientos + sistema esclusa-compuerta en Paricuica. El segundo, denominado “evaluación cualitativa no detallada”, en el cual se evalúan de manera independiente seis (6) diferentes alternativas, como se describe a continuación.

8.1. EVALUACIÓN CUALITATIVA DETALLADA

Con la “evaluación cualitativa detallada”, se evalúan de manera independiente las acciones de cada una de las alternativas consideradas, como se describe a continuación.

8.1.1. Selección de alternativas e identificación de acciones significativas

Para cada alternativa seleccionada se identifican las acciones susceptibles de generar impactos durante la etapa de operación de cada una de ellas, tal como se muestra en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1: Identificación y Selección de Acciones impactantes en cada alternativa

Alternativa	Etapa	Acciones relevantes en cada Alternativa
Alt0. CONDICIÓN ACTUAL	Operación	1 Entrada libre de caudales al Canal (Qm = 508 m ³ /s)
		2 Dragado en Calamar (2x300.000 m ³ /año)
		3 Dragado en Soplamiento (1x300.000 m ³ /año)
		4 Dragado en Pasacaballos (2x150.000 m ³ /año) (descarga a la bahía)
		5 Interconexiones canal - ciénagas de la ecorregión SIN CONTROL INSTITUCIONAL
Alt2. UNAL CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA	Operación	1 Entrada libre de caudales al Canal (Qm = 508 m ³ /s)
		2 Dragado en Calamar (2 x 600.000 m ³ /año) (ampliación trampa sedimentos)
		3 Dragado en Pasacaballos (2 x 300.000 m ³ /año) (succión y descarga al mar)
		4 Interconexiones canal - ciénagas de la ecorregión CON CONTROL INSTITUCIONAL
Alt3. UNAL CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA + EXCLUSOR EN CALAMAR	Operación	1 Entrada libre de caudales al Canal (aumento de Qm a 585 m ³ /s)
		2 Dragado en Calamar (con rastillo)
		3 Dragado en Pasacaballos (succión y descarga al mar)
		4 Interconexiones canal - ciénagas de la ecorregión CON CONTROL INSTITUCIONAL
		5 Control sedimentos (arenas) mediante EXCLUSOR en Calamar
Alt4. CNR CONTROL CAUDAL Y SEDIMENTOS MEDIANTE ESCLUSAS Y COMPUERTA EN CALAMAR	Operación	1 Regulación caudales al Canal mediante COMPUERTA (Qm = 373 m ³ /s) y ESCLUSAS
		2 Dragado en Calamar (1.000.000 m ³ /año)
		3 Dragado en Soplamiento (280.000 m ³ /año)
		4 Dragado en Pasacaballos (600.000 m ³ /año) (succión y descarga al mar)
		5 Interconexiones canal - ciénagas de la ecorregión CON CONTROL INSTITUCIONAL
Alt5. UNAL CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA + 3 ESTRECHAMIENTOS + ESCLUSAS Y COMPUERTA EN EL RECREO	Operación	1 Entrada libre de caudales al Canal (Qm = 508 m ³ /s)
		2 Dragado en Calamar (ampliación trampa sedimentos)
		3 Dragado en El Retiro (succión y descarga al mar)
		4 Interconexiones canal - ciénagas de la ecorregión CON CONTROL INSTITUCIONAL
		5 Tres (3) estrechamientos con reducción de 30% de Caudal
		6 Control caudal mediante ESCLUSAS Y COMPUERTA EN EL RECREO

8.1.2. Identificación y ponderación de factores ambientales

Los factores ambientales susceptibles de ser impactados se identifican y seleccionan en concordancia con los requerimientos de protección ambiental establecidos en la Res.249/04 del MAVDT.

Los factores ambientales presentan importancias relativas según su mayor o menor contribución al estado del medio ambiente y por lo tanto se asumen 1000 Unidades de Importancia Ponderada (P) para un medio ambiente óptimo, los cuales de común acuerdo con el Panel de Expertos, se reparten entre los Factores Ambientales considerados, tal como se muestra en la Tabla 8-2.

Tabla 8-2: Identificación y ponderación de Factores Ambientales

Sectores del Desarrollo	Bienes y Servicios	Medio Ambiente	Factores Ambientales		P [0-1000]				
Ecosistemas	Recursos Naturales Renovables	Agua	F1	Disponibilidad agua para riego (1)	20				
			F2	Disponibilidad caudal ecológico cuerpos de agua (2) (11)	100				
			F3	Disponibilidad agua consumo humano (4)	50				
	Servicios Ambientales	Regulación	F4	Salinización Cuerpos Agua Dulce Superficial (3)	100				
			F5	Salinización Cuerpos de Agua Salobre (manglares) (3)	20				
			F6	Salinización subsuperficial del Medio Poroso (3)	20				
		Soporte	F7	Navegabilidad en el Canal (18)	100				
			F8	Sedimentación en Río Magdalena (Calamar) (9)	10				
			F9	Sedimentación en el Alto Canal (9)	10				
			F10	Sedimentación en el Medio Canal (9)	10				
			F11	Sedimentación en el Bajo Canal (9)	10				
			F12	Sedimentación en el Caño Correa (9)	10				
			F13	Sedimentación en el Caño Matunilla (9)	10				
			F14	Sedimentación en el Caño Lequerica (9)	10				
			F15	Sedimentación en las Ciénagas del Alto Canal (9)	10				
			F16	Sedimentación en las Ciénagas del Medio Canal (9)	10				
			F17	Sedimentación en las Ciénagas del Bajo Canal (9)	10				
			F18	Sedimentación (gruesos depositables) en Bahía de Cartagena (9)	80				
			F19	Sedimentación (finos no depositables) en Bahía de Cartagena (9)	50				
			F20	Sedimentación Total (finos + gruesos) en Bahía de Barbacoas (9)	20				
			F21	Sedimentación Total (finos + gruesos) al mar por caño Correa (9)	20				
			F22	Sedimentación a Corales por sedimentos al mar (13)	20				
SUBTOTAL ECOSISTEMA					700				
Sector Público	Recursos Institucionales para la gestión ambiental pública	Humanos	F23	Ejercicio de la Autoridad Ambiental (16)	100				
		Legales y Normativos							
		Organizacionales							
		Científico - Tecnológicos							
		Instrumentos Económicos							
		Instrumentos Financieros							
		Políticas, Planes, Prog., Proy.							
SUBTOTAL SECTOR PÚBLICO					100				
Sector Productivo	Bienes y Servicios creados con fines productivos	Infraestructura Productiva, Vías y Transporte, Energética, Ciencia y Tecnología, Financiera	F24	Productividad Pesquera (12)	50				
			F25	Productividad Agrícola (12)	20				
			F26	Productividad Pecuaria (12)	20				
			F27	Productividad Camaroneras (12)	10				
			SUBTOTAL SECTOR PRODUCTIVO		100				
Sociedad Civil	Asentamientos (Urbanos, Rurales, Comunidades Étnicas)	Demografía, Salud, Alimentación, Vivienda, Empleo, Servicios Públicos, Participación, etc.	F28	Condiciones de Vida de la Población (16)	100				
SUBTOTAL SOCIEDAD CIVIL					100				
TOTAL P					1000				

8.1.3. Identificación y previsión de impactos ambientales significativos

La identificación y previsión de los impactos ambientales significativos para cada alternativa considerada, se realiza a través de la Matriz de Identificación de Impactos, tal como se muestra en la Tabla 8-3.

Tabla 8-3: Matriz de Identificación de Impactos

FACTORES AMBIENTALES	UP [0-100]	ANIL CONDICIÓN ACTUAL		ANIL UNAL CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA		ANIL UNAL CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA * EXCLUSOR EN CALAMAR		ANIL CNR CONTROL CAUDAL Y SEDIMENTOS MEDIANTE ESCLUSA Y COMPARTA EN CALAMAR		ANIL UNAL CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA * ESTRECHAMIENTOS * ESCLUSA Y COMPARTA EN EL RECREO	
		Drenaje Baja de Caudal (Canal + Canal + Río)	Drenaje en el Canal + Río + Estuario	Drenaje en el Canal + Río + Estuario	Drenaje en el Canal + Río + Estuario	Drenaje en el Canal + Río + Estuario	Drenaje en el Canal + Río + Estuario	Drenaje en el Canal + Río + Estuario	Drenaje en el Canal + Río + Estuario	Drenaje en el Canal + Río + Estuario	Drenaje en el Canal + Río + Estuario
F1 Disponibilidad agua para riego (1)	20			*				*			
F2 Disponibilidad caudal ecológico cuerpos de agua (2) (11)	100			*				*			
F3 Disponibilidad agua consumo humano (4)	50			*				*			
F4 Salinización Cuerpos Agua Dulce Superficial (3)	50										
F5 Salinización Cuerpos de Agua Salobre (manglares) (3)	30										
F6 Salinización subsuperficie del Medio Poroso (3)	30										
F7 Navegabilidad en el Canal (18)	50	*	*	*		*		*		*	
F8 Sedimentación en Rio Magdalena (Calamar) (9)	10	*						*			
F9 Sedimentación en el Alto Canal (9)	10	*	*			*					
F10 Sedimentación en el Medio Canal (9)	10	*	*	*		*					
F11 Sedimentación en el Bajo Canal (9)	10	*	*	*		*					
F12 Sedimentación en el Caño Correa (9)	10	*	*								
F13 Sedimentación en el Caño Matalilla (9)	10	*	*								
F14 Sedimentación en el Caño Lequeira (9)	10	*	*								
F15 Sedimentación en las Ciénegas del Alto Canal (9)	10										
F16 Sedimentación en las Ciénegas del Medio Canal (9)	10	*	*	*		*		*		*	
F17 Sedimentación en las Ciénegas del Bajo Canal (9)	10	*	*	*		*		*		*	
F18 Sedimentación (gruesos depositables) en Bahía de Cartagena (9)	100	*	*	*		*		*			
F19 Sedimentación (finos no depositables) en Bahía de Cartagena (9)	50	*									
F20 Sedimentación Total (finos + gruesos) en Bahía de Barbacoas (9)	50	*									
F21 Sedimentación Total (finos + gruesos) al mar por caño Correa (9)	30	*	*								
F22 Sedimentación a Coales por sedimentos al mar (13)	20	*	*	*		*		*		*	
F23 Ejercicio de la Autoridad Ambiental (16)	100	*	*	*		*		*		*	
F24 Productividad Pesquera (12)	70	*									
F25 Productividad Agropecuaria (12)	20	*									
F26 Productividad Cenizonebras (12)	10	*									
F27 Riesgo de Inundación en áreas urbanas (12)	20	*									
F28 Condiciones de Vida de la Población (16)	100	*									

8.1.4. Caracterización importancia intrínseca de impactos ambientales

Consiste en determinar la importancia absoluta y relativa del efecto de cada acción sobre los factores ambientales considerados, en función de ciertas características intrínsecas de cada impacto relacionadas con su naturaleza (+/-), intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, sinergismo, acumulación, relación causa-efecto, periodicidad y recuperabilidad.

La importancia intrínseca de cada impacto se calcula siguiendo el modelo propuesto por Conesa Fernández – Víctor (2003), mediante la ecuación experimental: $I = +/- [3IN + 2 EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC]$, cuya valoración se determina con referencia a la información de la Tabla 8-4.

Tabla 8-4: Valoración características intrínsecas de impactos

CARACTERÍSTICA		DESCRIPCIÓN	VALORACIÓN CUALITATIVA	
I	IMPORTANCIA	Medida cualitativa del impacto a partir del grado de incidencia de la alteración producida y de sus efectos	Irrelevante	0 - 25
			Moderado	25 - 50
			Severo	50 - 75
			Crítico	75 - 100
NA	NATURALEZA	Carácter beneficioso o perjudicial del impacto	Beneficioso	1+
			Perjudicial	1-
IN	INTENSIDAD	Grado de incidencia de la acción sobre el factor (desde mínima a destrucción total)	Baja	1
			Media	2
			Alta	4
			Muy Alta	8
			Total	12
EX	EXTENSIÓN	Área de influencia esperada en relación con el entorno del proyecto que puede ser representada en términos porcentuales.	Puntual	1
			Parcial	2
			Extenso	4
			Total	8
			Crítico	4+
MO	MOMENTO	Tiempo que transcurre desde el inicio de la acción y el inicio del impacto que produce. Corto plazo (menos de un año), medio plazo (1 a 5 años), largo plazo (más de 5 años)	Largo Plazo	1
			Medio Plazo	2
			Inmediato	4
			Crítico	4+
PE	PERSISTENCIA	Tiempo que se espera permanezca el impacto desde su aparición. Fugaz (menos de 1 año), Temporal (1 a 10 años), Permanente (más de 10 años)	Fugaz	1
			Temporal	2
			Permanente	4
RV	REVERSIBILIDAD	Posibilidad de reconstruir el factor afectado por medios naturales. Corto plazo (menos de un año), medio plazo (1 a 10 años), largo plazo (más de 10 años)	Corto Plazo	1
			Medio Plazo	2
			Irreversible	4
SI	SINERGIA	Dos impactos son sinérgicos si su manifestación conjunta es superior a la suma de las manifestaciones separadas. Si hay debilitamiento, la sinergia es negativa.	Sin Sinergismo	1
			Sinérgico	2
			Muy Sinérgico	4
AC	ACUMULACIÓN	Un impacto es acumulativo si la presencia continuada de la acción hace que el impacto crezca con el tiempo	Simple	1
			Acumulativo	4
EF	CAUSA/EFFECTO	Directa si es la acción misma la que origina el impacto. Indirecta si es otro impacto	Indirecto	1
			Directo	4
PR	PERIODICIDAD	Regularidad de la manifestación del impacto.	Irregular	1
			Periódico	2
			Continuo	4
MC	RECUPERABILIDAD	Posibilidad de reconstruir el factor afectado mediante gestión ambiental	Inmediata	1
			Medio Plazo	2
			Mitigable	4
			Irrecuperable	8

8.1.5. Resultados valoración y análisis cualitativo

La valoración y análisis cualitativo permite comparar para cada alternativa considerada, por un lado, la agresividad y/o bondad de cada acción sobre el medio ambiente, determinada a través de la importancia intrínseca relativa de cada acción ($I_{R-Aj} = \sum P_i I_{ij}$), y por otro lado, el deterioro y/o mejoramiento ambiental inflingido por cada alternativa sobre cada uno de los factores ambientales, determinado a través del total de la importancia intrínseca relativa de cada factor ambiental ($I_{Ri} = P_i \sum I_{ij}$). En las siguientes figuras se muestran los resultados de las valoraciones realizadas para cada alternativa.

Figura 8-1: Agresividad y/o Bondad acciones Alt 0

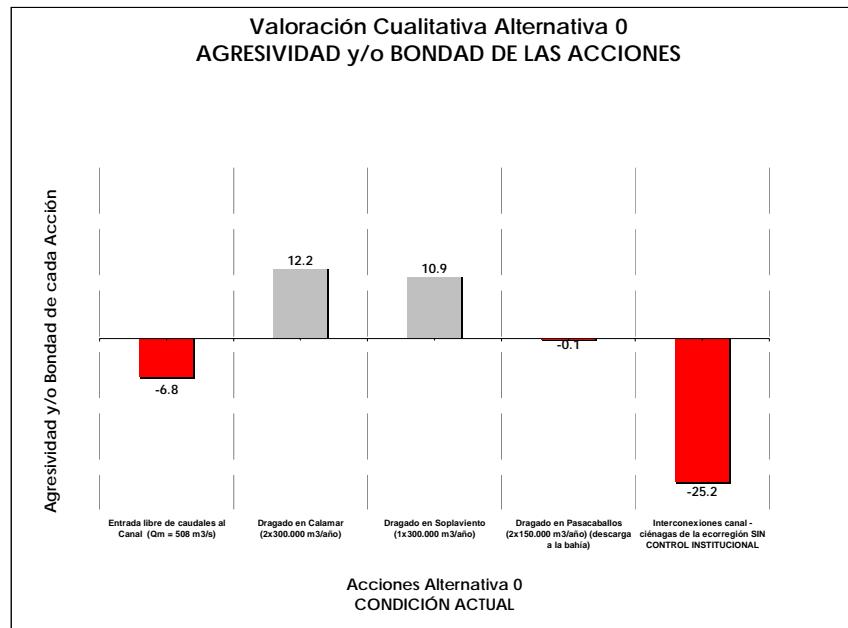


Figura 8-2: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental Alt 0

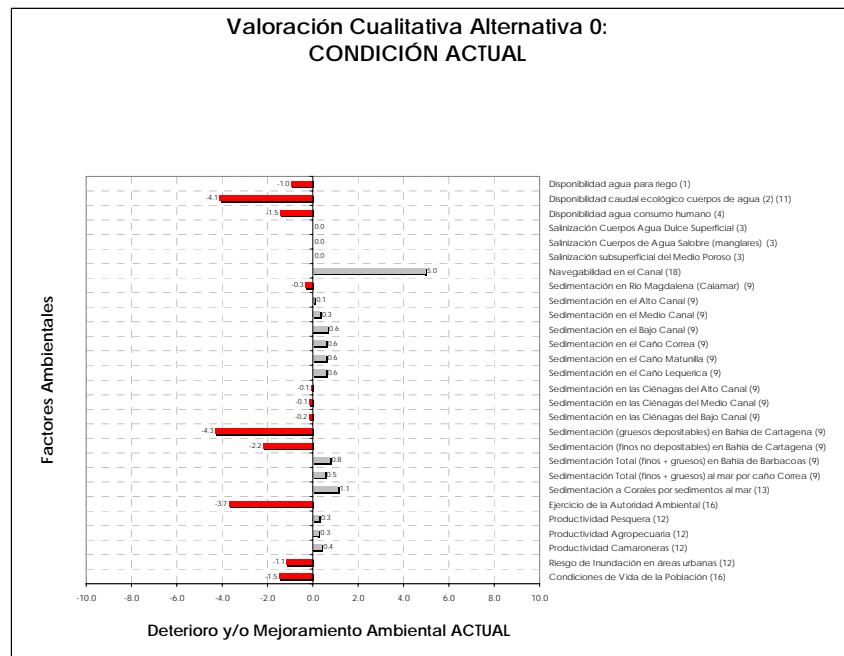


Figura 8-3: Agresividad y/o Bondad Acciones Alt2

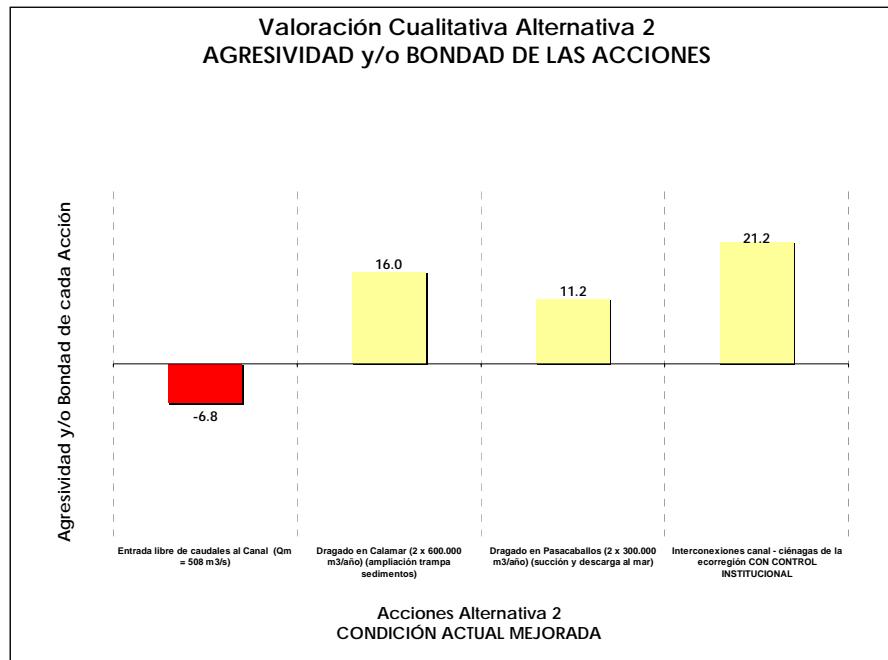


Figura 8-4: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt2

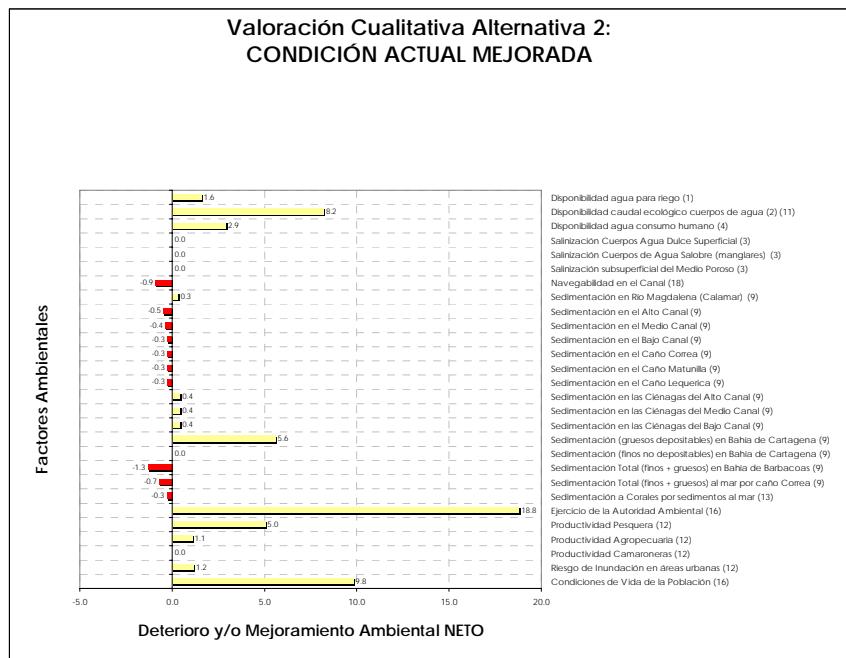


Figura 8-5: Agresividad y/o Bondad Acciones Alt3

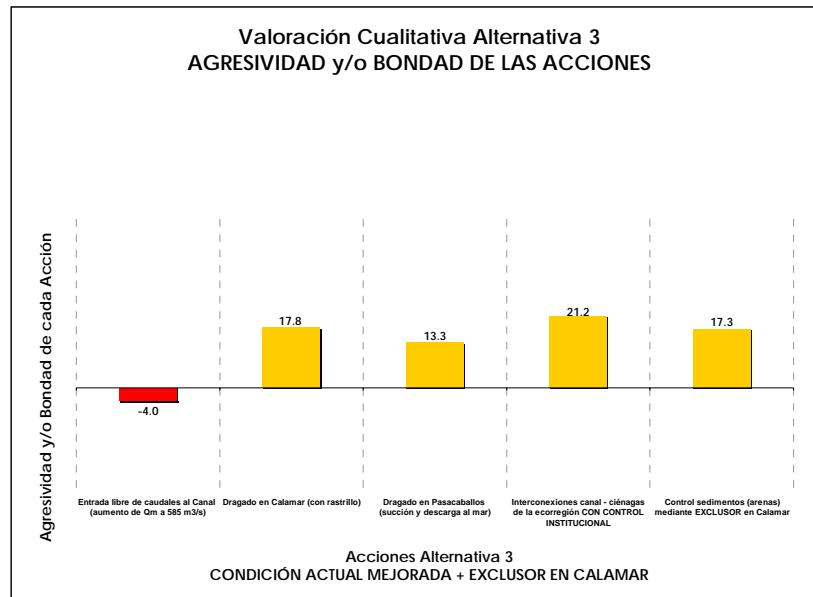


Figura 8-6: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt3

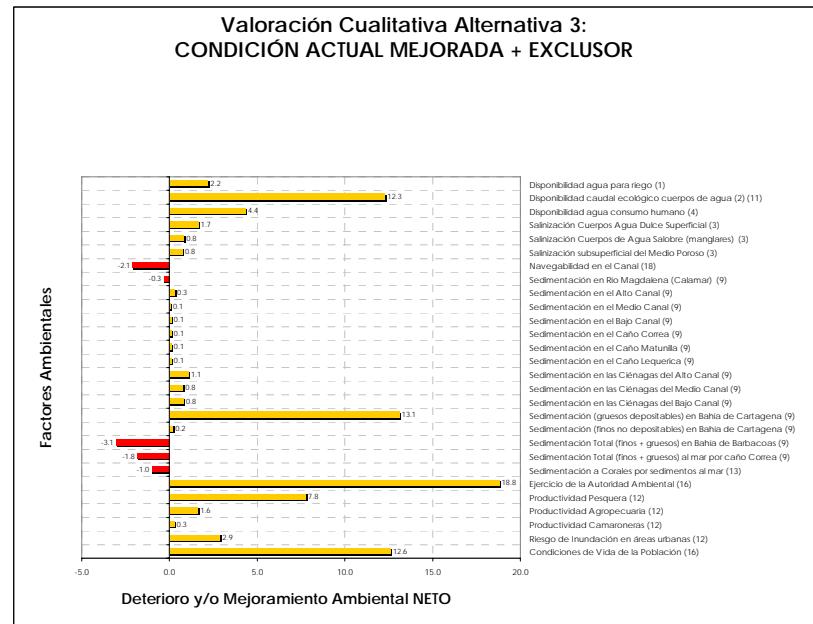


Figura 8-7: Agresividad y/o Bondad Acciones Alt4

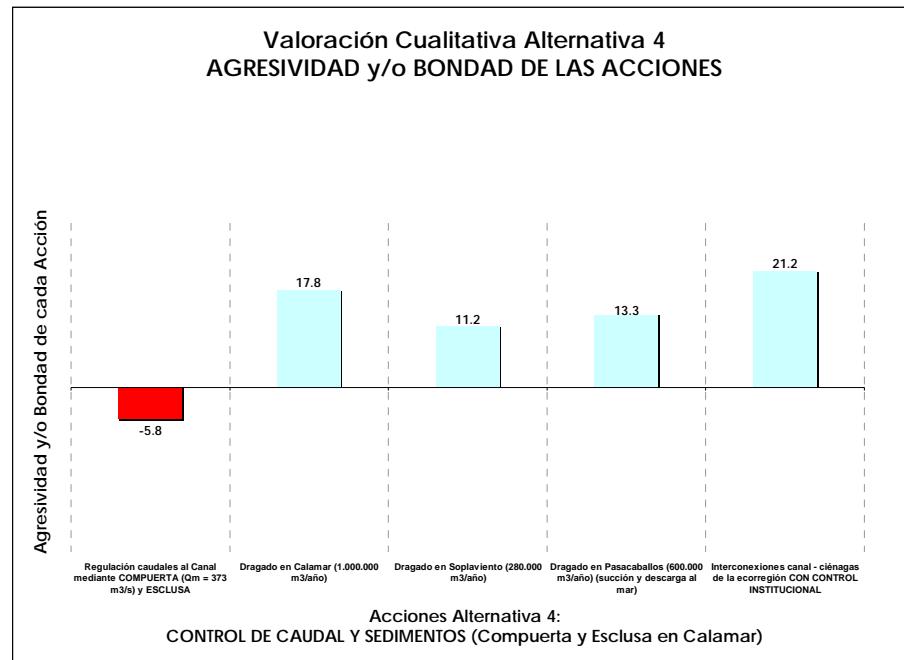


Figura 8-8: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt4

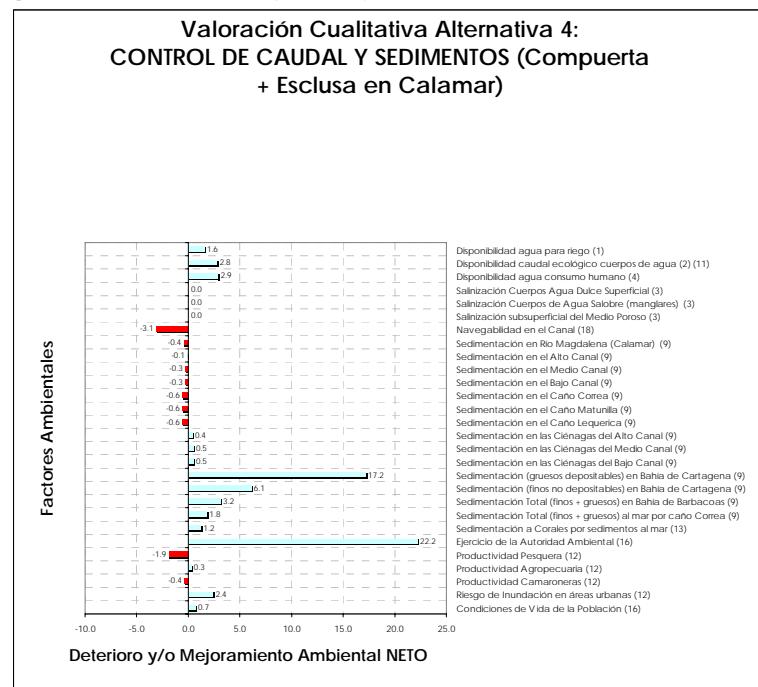


Figura 8-9: Agresividad y/o Bondad Acciones Alt5

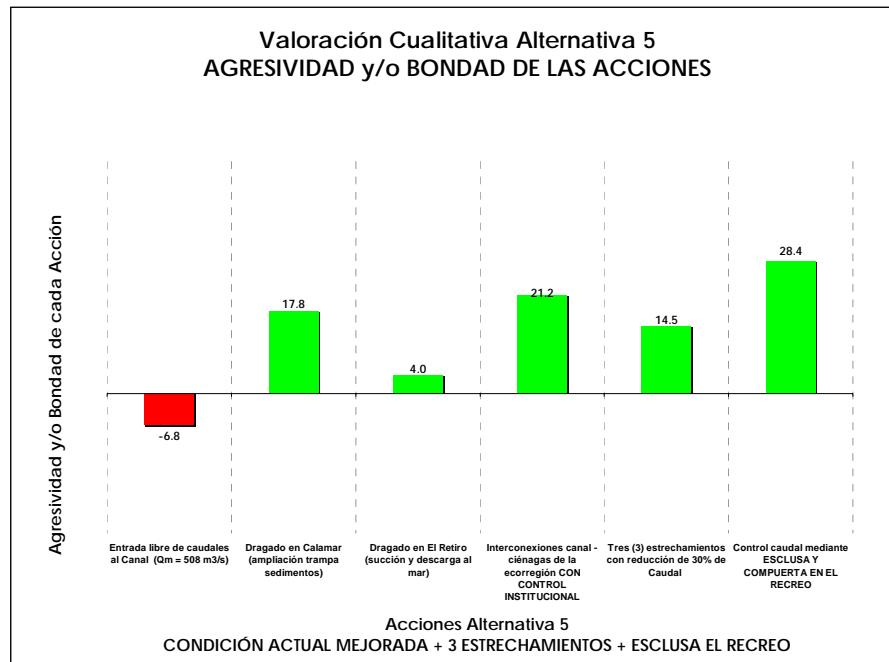


Figura 8-10: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt5

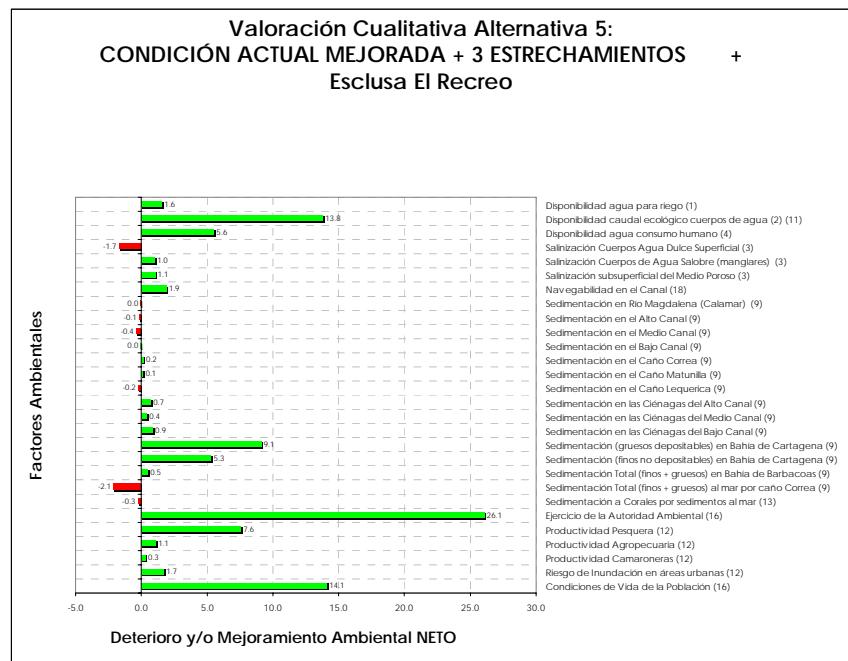
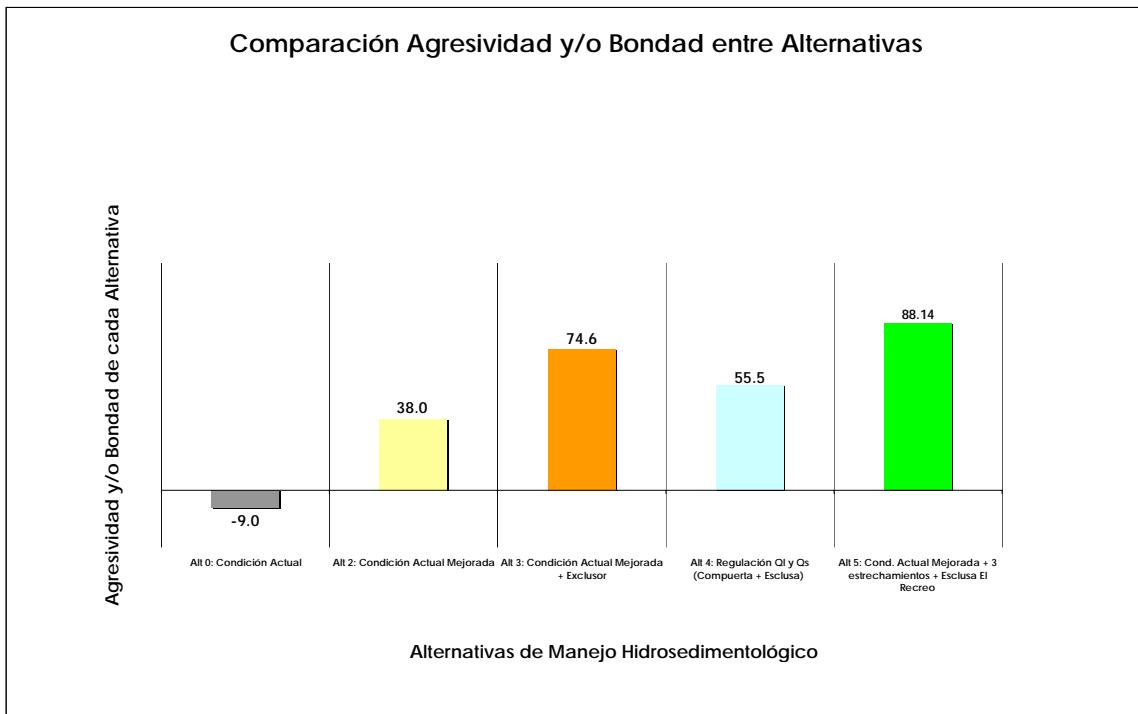


Figura 8-11: Comparación Agresividad y/o Bondad entre Alternativas



Como se puede apreciar, la última Alternativa (Alternativa 4 del presente estudio) (**Condición Actual Mejorada + 3 Estrechamientos + Esclusa-Compuerta en el Recreo**) se constituye en la alternativa que presenta una mayor bondad con el medio ambiente.

8.2. EVALUACIÓN CUALITATIVA NO DETALLADA

Con la “evaluación cualitativa no detallada”, se evalúan de manera global e independiente las alternativas consideradas, como se describe a continuación.

8.2.1. Selección de alternativas

Tabla 8-5: Identificación y Selección de Alternativas

Etapa	ALTERNATIVAS CONSIDERADAS
Operación	1 ALT1: CONDICIÓN ACTUAL (sin angostamientos ni compuerta esclusa)
	2 ALT2: CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA (interconexiones ciénaga - canal optimizadas) y COMPUERTA-ESCLUSA EN PARICUICA RK104 (El Recreo)
	3 ALT3: CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA Y 3 ANGOSTAMIENTOS
	4 ALT4: CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA Y COMPUERTA ESCLUSA EN RK104 (El Recreo) Y 3 ANGOSTAMIENTOS
	5 ALT5: CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA Y COMPUERTA ESCLUSA EN RK110 ABAJO DE LEQUERICA
	6 ALT6: CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA Y COMPUERTA ESCLUSA EN RK110 Y 3 ANGOSTAMIENTOS

8.2.2. Identificación y ponderación de factores ambientales

En este caso se utilizan los mismo Factores Ambientales considerados en la evaluación cualitativa detallada.

8.2.3. Identificación y previsión de impactos ambientales significativos

La identificación y previsión de los impactos ambientales significativos para cada alternativa considerada, se realiza a través de la Matriz de Identificación de Impactos, tal como se muestra en la Tabla 8-6

Tabla 8-6: Matriz de Identificación de Impactos

FACTORES AMBIENTALES	UIP [0-1000]	ALTERNATIVAS CONSIDERADAS				
		ALT1: CONDICIÓN ACTUAL (sin angostamientos ni compuerta esclusa)	ALT2: CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA (interconexiones optimizadas y compuerta esclusa en PARICUCA PK164 (El Recreo))	ALT3: CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA Y 3 ANGOSTAMIENTOS	ALT4: CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA Y COMPUERTA ESCLUSA EN PK164 (El Recreo) Y 3 ANGOSTAMIENTOS	ALT5: CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA Y COMPUERTA ESCLUSA EN PK119 ABAJO DE LIQUERICA
		ALT6: CONDICIÓN ACTUAL MEJORADA Y COMPUERTA ESCLUSA EN PK119 Y 3 ANGOSTAMIENTOS				
F1 Disponibilidad agua para riego (1)	20					
F2 Disponibilidad caudal ecológico cuerpos de agua (2) (11)	100					
F3 Disponibilidad agua consumo humano (4)	50		•	•	•	•
F4 Salinización Cuerpos Agua Dulce Superficial (3)	50		•		•	
F5 Salinización Cuerpos de Agua Salobre (manglares) (3)	30		•		•	
F6 Salinización subsuperficial del Medio Porooso (3)	30		•		•	
F7 Navegabilidad en el Canal (18)	50		•	•	•	•
F8 Sedimentación en Río Magdalena (Calamar) (9)	10					
F9 Sedimentación en el Alto Canal (9)	10	•				
F10 Sedimentación en el Medio Canal (9)	10	•				
F11 Sedimentación en el Bajo Canal (9)	10	•	•		•	•
F12 Sedimentación en el Caño Correa (9)	10	•	•		•	•
F13 Sedimentación en el Caño Matunilla (9)	10	•	•		•	•
F14 Sedimentación en el Caño Lequerica (9)	10	•				•
F15 Sedimentación en las Ciénagas del Alto Canal (9)	10	•				
F16 Sedimentación en las Ciénagas del Medio Canal (9)	10	•				
F17 Sedimentación en las Ciénagas del Bajo Canal (9)	10	•	•		•	•
F18 Sedimentación (gruesos depositables) en Bahía de Cartagena (9)	100	•	•	•	•	•
F19 Sedimentación (finos no depositables) en Bahía de Cartagena (9)	50	•	•	•	•	•
F20 Sedimentación Total (finos + gruesos) en Bahía de Barbacoas (9)	50	•	•	•	•	•
F21 Sedimentación Total (finos + gruesos) al mar por caño Correa (9)	30	•	•	•	•	•
F22 Sedimentación a Corales por sedimentos al mar (13)	20	•	•	•	•	•
F23 Ejercicio de la Autoridad Ambiental (16)	100	•	•	•	•	•
F24 Productividad Pesquera (12)	70				•	•
F25 Productividad Agropecuaria (12)	20					
F26 Productividad Camaroneras (12)	10		•		•	
F27 Riesgo de Inundación en áreas urbanas (12)	20	•	•		•	
F28 Condiciones de Vida de la Población (16)	100	•	•		•	•

8.2.4. Caracterización importancia intrínseca de impactos ambientales

Se realiza de la misma manera que en la evaluación cualitativa detallada.

8.2.5. Resultados valoración y análisis cualitativo

La valoración y análisis cualitativo en el proceso evaluativo no detallado permite comparar entre si las alternativas consideradas.

Figura 8-12: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental Alt1

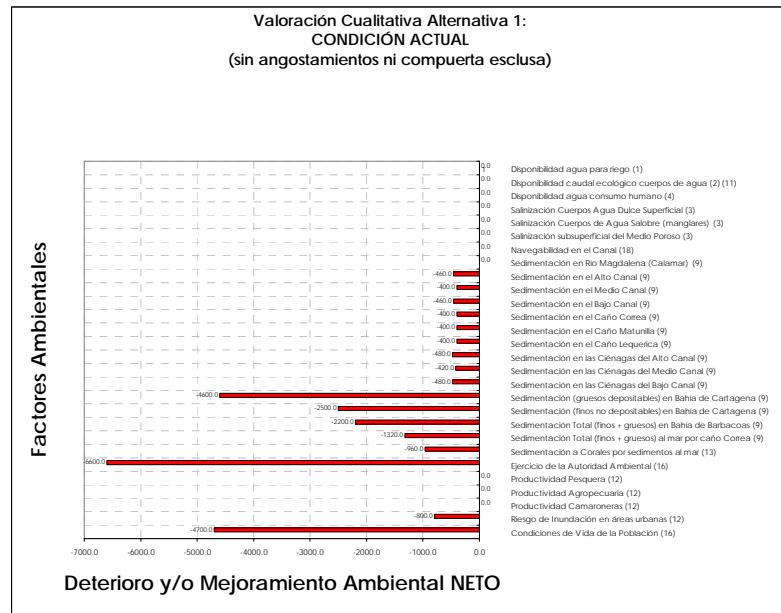


Figura 8-13: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt2

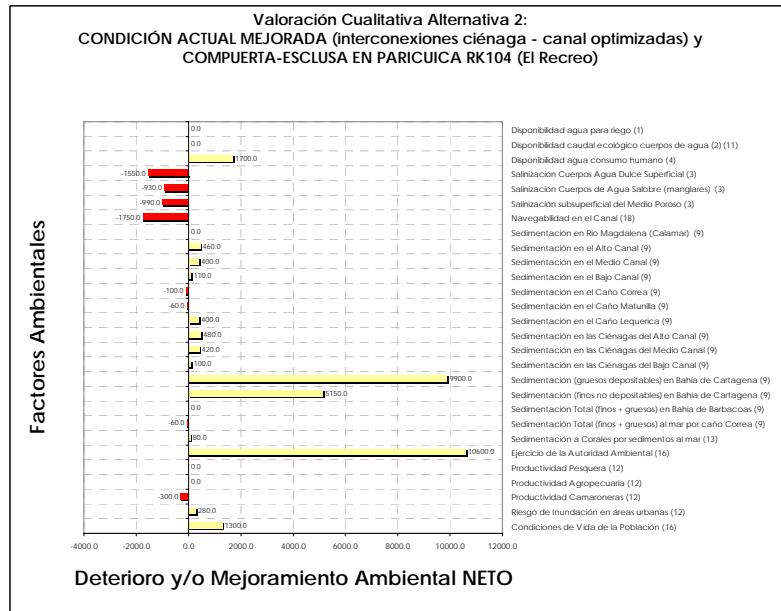


Figura 8-14: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt3

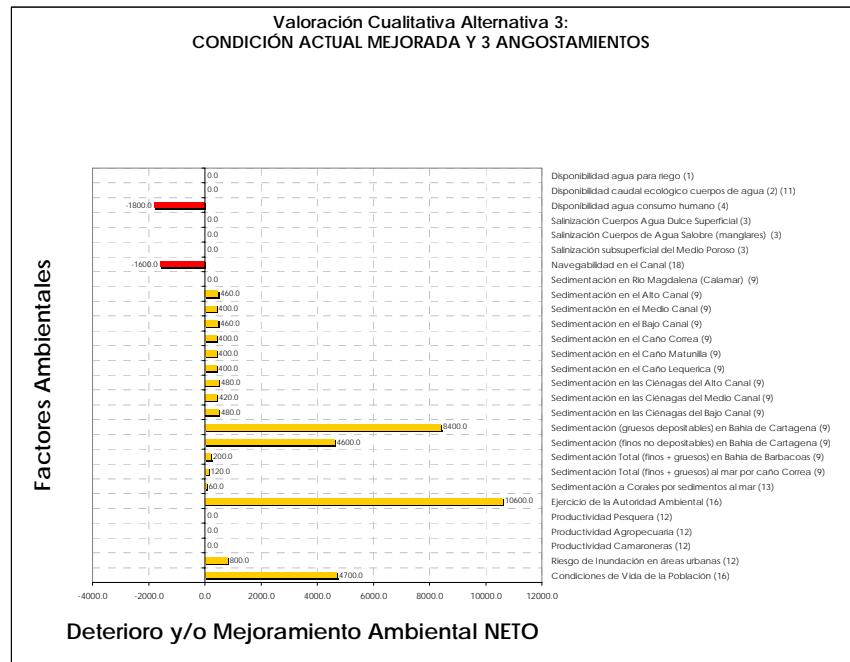


Figura 8-15: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt4

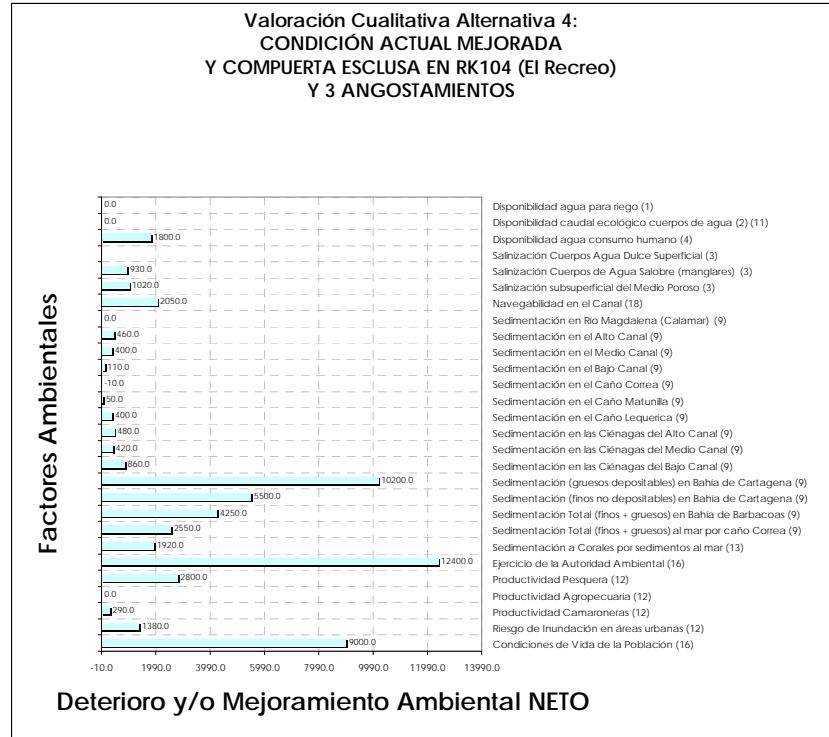


Figura 8-16: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt5

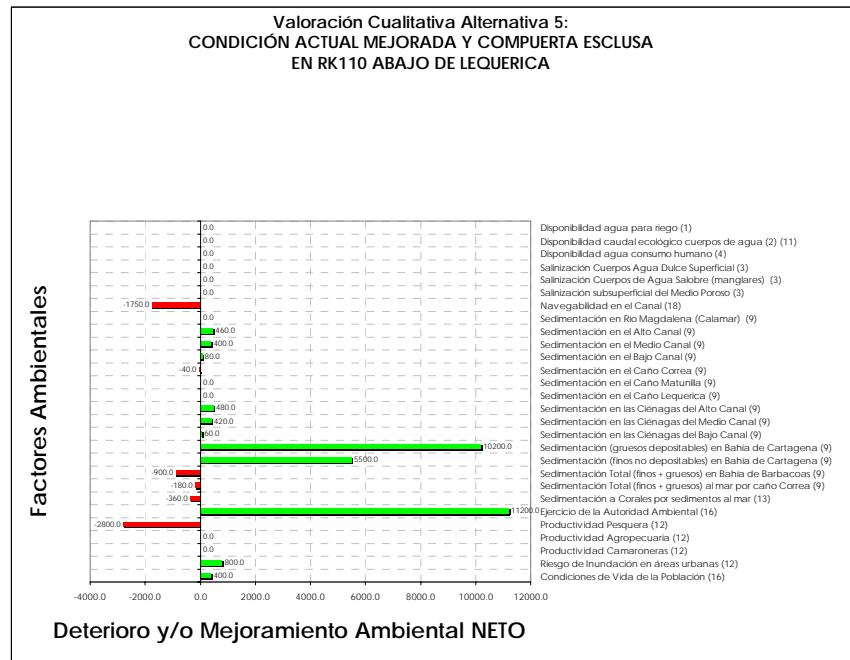


Figura 8-17: Deterioro y/o Mejoramiento Ambiental NETO Alt6

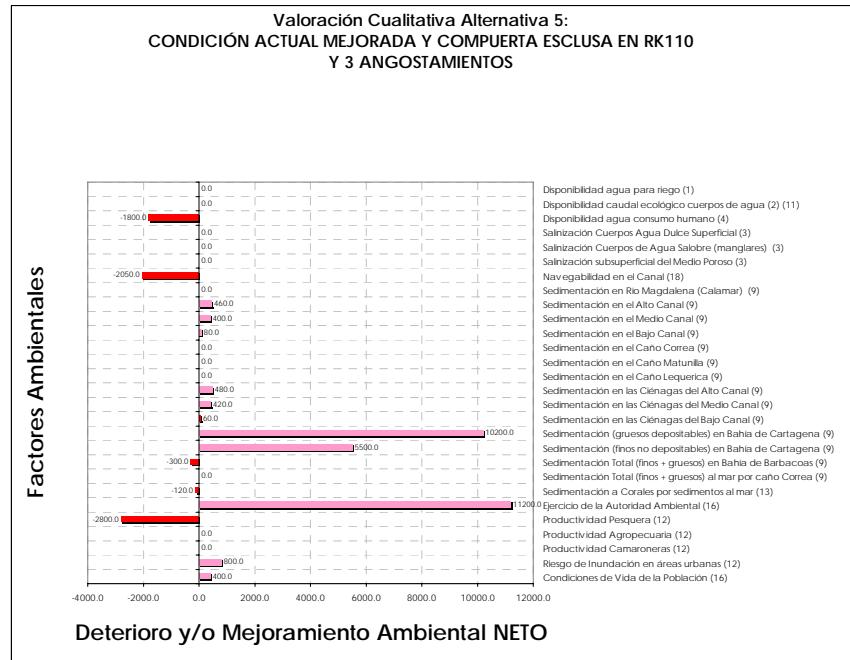
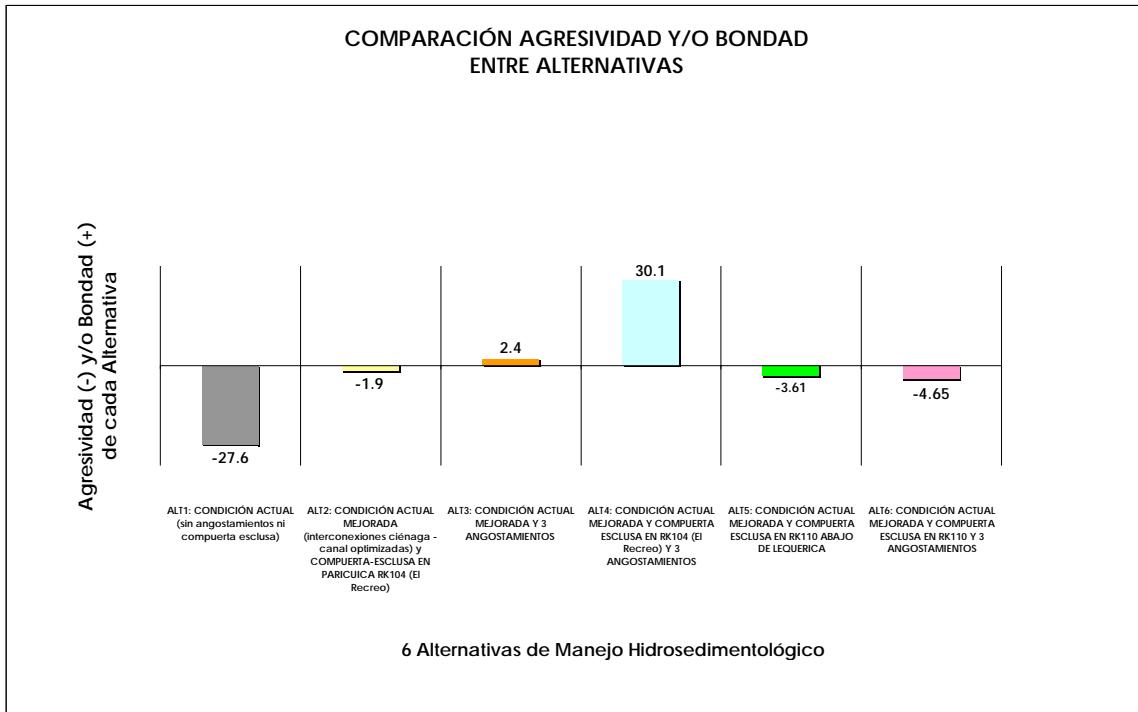


Figura 8-18: Agresividad y/o Bondad entre Alternativas



Como se puede apreciar, la Alternativa 4 (Condición Actual Mejorada + 3 Estrechamientos + Esclusa-Compuerta en el Recreo) se constituye en la alternativa que presenta una mayor bondad con el medio ambiente.

9. CONCLUSIONES

De manera integral, la nueva alternativa propuesta para el control sedimentológico del Canal del Dique implicaría las siguientes acciones:

- Tres estrechamientos para reducir caudales manteniendo los niveles.
- Esclusa y compuerta en el estrecho de Paricuica, cerca de la población de El Recreo, (Km 104).
- Desvío del caudal a través de los caños Correa y Matunilla hacia el mar y la Bahía de Barbacoas.
- Optimización de los dragados al inicio y final del canal.
- Mejoramiento de las conexiones canal-ciénagas.
- Fortalecimiento del ejercicio de la autoridad ambiental en la ecorregión.

A continuación se realiza de manera preliminar, una breve identificación de los impactos más significativos que se generarían con cada una de las acciones planteadas con esta nueva alternativa:

9.1. EFECTOS FÍSICOS

1. La acción de reducción de caudal mediante estrechamientos en tres sitios diferentes a lo largo del Canal, no tendrá mayor influencia sobre la navegación de carga, toda vez que la frecuencia de viajes no es muy alta y con la introducción de una o dos estaciones de control en el Canal para en el tránsito de remolques-planchones puede ser fácilmente controlado; una de estas estaciones estaría en el sitio de la esclusa, pero posiblemente sea conveniente también la instalación de otra en Calamar.
2. La acción de reducción de caudal mediante estrechamientos en tres sitios diferentes a lo largo del Canal, no tendría ningún impacto sobre la navegación doméstica.
3. La acción de regulación y control de caudal mediante el sistema de esclusa y compuerta en el estrecho de Paricuica, obligará a cambiar el sistema de navegación pasando de un sistema no-restringido a uno restringido, en el cual, las embarcaciones deberán hacer turno, (en el caso de frecuencias de viajes altas), para poder pasar la esclusa. Esto implicaría costos adicionales de operación por demora de las embarcaciones, pero que con un buen plan de regulación en el tránsito de las embarcaciones de carga, dicho impacto puede ser fácilmente controlado.

4. La acción de regulación y control de caudal mediante el sistema de esclusa y compuerta en el estrecho de Paricuica, afectará en alto grado el libre tránsito de la navegación doméstica, ya que generará cambios radicales a la navegación local de la gente y de las pequeñas embarcaciones de pasajeros, dado que la esclusa no podría ser operada para el simple paso de una canoa, o aún, de una lancha de pasajeros, afectando las condiciones de navegación imperantes en el Canal y la calidad de vida de los habitantes a nivel regional, en la zona de Pasacaballos.
5. Se podría plantear como solución la construcción de un tramo paralelo a la esclusa para tráfico ligero, la cual podría resultar beneficiosa al no interferir con las operaciones de transporte de carga, siempre y cuando su operación sea de fácil acceso y manejo para cualquier motorista, que no le demande esfuerzos extras y que pueda ser operada a cualquier hora del día y/o de la noche. Igualmente se debe pensar en la necesidad de un paso para los peces a fin de minimizar la perturbación del ecosistema y la pesca en la zona de la desembocadura del canal del Dique en la Bahía de Cartagena.
6. La acción de desvío del caudal y los sedimentos a través de los caños Correa, y Matunilla hacia la Bahía de Barbacoas podría generar impactos ambientales en la ecorregión, particularmente en las ciénagas de María La Baja y La Honda y el Santuario de Fauna y Flora "El Corchal Mono Nuñez". También es posible que se incrementen los problemas de inundación de algunas poblaciones ribereñas del caño Correa, y del Canal hasta el sitio de la esclusa. Otro impacto importante es sobre la bahía de Barbacoas, la cual ha venido operando en los últimos años como un gran sedimentador, pero que con un manejo ambiental adecuado, podría habilitarse para el beneficio de los pobladores, algunas funciones y servicios ambientales a través de un programa dirigido técnicamente para distribuir de manera ordenada los sedimentos depositados, por ejemplo mediante la conformación de compartimientos con diques permeables, donde se puedan implementar programas de reforestación con especies de mangle y otras especies autóctonas, así como el desarrollo de programas de maricultura, a través de jaulas para zocriadero de peces, caimanes, etc.
7. La acción de optimización de los dragados al inicio y final del canal, tendrá impactos positivos tanto para la navegación de carga, como para la navegación doméstica, toda vez que aunque la navegabilidad en el Canal del Dique está garantizada actualmente durante la mayor parte del año para embarcaciones con calados hasta de 9 pies, esta se reduce ligeramente en los períodos de estiaje, por lo cual es de fundamental importancia el mantenimiento adecuado del canal, mediante los dragados respectivos a la entrada de Calamar y en su desembocadura en Pasacaballos.
8. Las acciones de mejoramiento de las conexiones canal-ciénagas y el fortalecimiento del ejercicio de la autoridad ambiental en la ecorregión tendrán impactos positivos tanto para la navegación de carga, como para la navegación doméstica, mejorando de paso el funcionamiento ecológico del sistema lagunar y las condiciones limnológicas y ambientales de la ecorregión.

Con lo anterior, se puede decir que, de acuerdo con los resultados obtenidos, la alternativa de disminución de caudal mediante agostamiento de la sección del Canal en los sitios

estratégicos seleccionados, donde el alineamiento es recto y la visibilidad entre embarcaciones puede ser total, funciona hidráulicamente en forma adecuada, lográndose una reducción en el caudal medio a lo largo del Canal entre del 27%, que es muy substancial.

Esta disminución de caudal va acompañada de una disminución proporcional de los caudales de salida por todos los caños, que es favorable desde el punto de vista de lograr una menor descarga de sedimentos hacia las Bahías y la zona costera al suroccidente de la de Barbacoas.

La construcción de la esclusa en la zona de Paracuica, entre los Caños Matunilla y Lequerica, permite llegar a la condición de cero descarga de agua fresca y sedimentos a la Bahía de Cartagena, o una descarga moderada, si las compuertas se mantienen abiertas en la estación de aguas bajas y medias. Esta adición aumenta la descarga hacia los Caños, pero dado que ella ya se había reducido en el 27%, la adición apenas lleva a una descarga muy parecida a la descarga actual de sedimentos hacia la Bahía de Barbacoas y la zona costera en la desembocadura del caño Correa.

La modelación lograda en la zona marina es suficiente, en combinación con la modelación hidrológica, hidráulica y de calidad del agua en el sistema lagunar, para comparar técnica y ambientalmente las alternativas consideradas, a pesar de las limitaciones existentes. Los resultados de las simulaciones son bastante buenos para la mayor parte de la Bahía de Barbacoas y la calibración obtenida se considera adecuada. El modelo es una valiosa contribución al entendimiento de los fenómenos de propagación y transporte de sedimentos en la zona costera, que involucran una pluma turbia cuyo espesor es sin embargo sorprendentemente delgado, y que se propaga predominantemente por el momentum impartido por el viento, sin formar corrientes concentradas de amplia capacidad de transporte; en estas condiciones, y considerando que la modelación por el momento es conservativa, dado que los trazadores utilizados no se sedimentan como si lo hacen los sedimentos reales, significa que los impactos sobre los corales de las Islas del Rosario son seguramente mínimos por cuenta de los sedimentos del canal del Dique.

Las épocas críticas para el avance de la pluma hasta las Islas del Rosario son aquellas en las cuales la dirección de los vientos fluctúa. La situación se agrava si el caudal proveniente de los caños es alto, pero las épocas de vientos fuertes no son críticas debido a que el viento sopla constantemente hacia el suroeste, alejando la pluma de las Islas del Rosario.

La comparación de alternativas realizada permite evaluar cualitativamente la que menos impacto genera. Las concentraciones de trazador estimadas en las Islas del Rosario para las alternativas estudiadas indican que alternativas como la A3 y la A4 sugieren concentraciones menores que aquellas para las condiciones actuales. Alternativas como la A2, A5 y A6 generan eventos con un aumento importante de las concentraciones con respecto a las condiciones actuales. Sin embargo, la forma de la pluma no muestra cambios significativos entre las alternativas. Las concentraciones reportadas en este informe solo sirven para dar una idea inicial de cómo la modificación de caudales modifica los patrones de transporte horizontal. Para una estimación de concentración de sedimentos más adecuada, se requiere incorporar en la modelación el proceso de floculación y sedimentación.

9.2. EFECTOS ECOLÓGICOS

La derivación de un mayor caudal del agua del Canal del Dique a través de los caños Correa y Matunilla tendrá innegables efectos positivos y negativos sobre la estructura y función de los ecosistemas ubicados entre el Canal y la Bahía de Barbacoas, y posiblemente sobre otros sistemas más alejados como los corales del Parque Nacional Natural Corales el Rosario y San Bernardo. En principio, es importante tener presente que este proyecto parte de las siguientes premisas:

- La depositación de los sedimentos de las aguas del Canal del Dique que llegan a la Bahía de Cartagena es perjudicial, y puede llegar a afectar la navegabilidad y la actividad portuaria en este importante puerto en el futuro.
- Los sedimentos del Canal del Dique están colmatando actualmente el sistema de ciénagas, pero los flujos de agua fresca son indispensables para el mejoramiento de la calidad del agua de las ciénagas y de su estado limnológico.
- Para el consumo diario de agua, las comunidades que habitan en las inmediaciones del Canal del Dique, incluyendo Cartagena, dependen de las aguas dulces que éste conduce, mediante sistemas de bombeo cuyo funcionamiento adecuado depende del mantenimiento de los niveles en el Canal.
- El mantenimiento de las condiciones de navegación en el canal del Dique es de interés económico y político para la nación Colombiana.
- La fauna y la flora y los ecosistemas naturales de la ecoregión dependen de los ciclos hidrológicos del Canal del Dique.
- Una parte importante de los sistemas productivos de la ecoregión, depende críticamente del ciclo hidrológico del Canal del Dique.

Una vez conocidas las premisas indicadas atrás, es necesario evaluar de manera exploratoria los posibles efectos del proyecto de reducción de caudales del Canal del Dique. A continuación se resumen algunos de estas posibles afectaciones:

9.2.1. Efectos Generales

- La cantidad de sedimentos en la Bahía de Cartagena disminuiría significativamente, resolviendo en forma completa los posibles problemas futuros de navegación.
- La cuña salina remontaría hasta la compuerta y el caño Lequerica se salinizaría; los aportes de agua dulce hacia la bahía de Barbacoas permanecen iguales o se reducen ligeramente.
- Las tendencias salinas favorecerían las formaciones de manglar y en este sentido estas prosperarían hasta tal punto que resultarían remplazando las formaciones de herbáceas y que crecen en las inmediaciones del Canal cerca de la Bahía de Cartagena.

- El flujo de agua y por lo tanto de sedimentos del caño Matunilla, aumentaría ligeramente, pero se reduciría a cero la entrada de sedimentos por el Caño Lequerica, lo que en total significa menor aporte de agua dulce y sedimentos a la bahía de barbacoas; se podría generar un aumento de la extensión de los playones fluviomarinos en la desembocadura en la Bahía de Barbacoas, reduciéndose los de la zona del caño Lequerica.
- Aumentaría el nivel de inundación en los sistemas lagunares desde El Caño Correa, (K80), hasta la esclusa o compuerta. Esta condición podría mejorar la navegabilidad del Canal pero también podría afectar los suelos cultivados y en cierta forma los sistemas productivos.
- En el delta de Barbacoas las formaciones de Corcho podrían verse beneficiadas con un mayor aporte de agua dulce pero los sedimentos podrían acelerar la colmatación de las ciénagas de desborde, sin embargo, el aumento del aporte de agua dulce y sedimentos es muy limitado debido a la reducción general del caudal en el Canal del Dique.
- Algunos sectores con manglar podrían perjudicarse por un aporte de sedimentos y por lo tanto por una consolidación de suelos y con la dominancia de vegetación de pezofílicas que finalmente podría remplazar a las halohelófilas. Estas condiciones requieren estudio y manejo adecuado.

9.2.2. Efectos Específicos Sobre los Ecosistemas del Delta de Barbacoas

El aumento de caudal implicará una dulcificación de la zona entre el Canal y la Bahía de Barbacoas, en la zona del Caño Matunilla; lo opuesto ocurriría en la zona del Caño Lequerica. Esto significa que habrá cambios en los aportes de agua dulce y que la influencia marina será diferente, por lo cual algunas ciénagas donde se presentan manglares más adaptados a condiciones salinas tenderán a ver desaparecer estas especies, (esto podría ocurrir con el mangle negro *A. germinas*), mientras que otras soportarían mejor la dulcificación, (el mangle rojo, por ejemplo). Esto posiblemente sucederá en las ciénagas más cercanas a la línea de costa. No obstante hay que tener en cuenta que el aumento de agua dulce es ligero, y puede verse contrarrestado por el actual incremento del nivel del mar ocasionado por el calentamiento global.

Como consecuencia de una mayor disponibilidad de agua dulce en algunos sectores, la composición de especies de peces, invertebrados, crustáceos y moluscos cambiará, desplazándose aquellos organismos que requieren mayor grado de salinidad. La salinización de un tramo del canal del Dique cambiará las condiciones fisicoquímicas de algunos cuerpos de agua, lo que claramente se reflejaría en cambios en la composición de las comunidades biológicas que allí habitan. Un ejemplo claro de estos cambios sería el retroceso de especies de peces de agua dulce a zonas que no tengan influencia de agua salina. Aunque en la zona existen algunas especies que soportan ciertos cambios de salinidad en el agua, hay muchas otras que son estrictamente dulceacuícolas y se verían relegadas a la zona del Canal que conserve solo agua dulce. Un efecto positivo de la dulcificación será el aumento del hábitat adecuado para el desarrollo de los corchales, los cuales seguramente tendrá mayor posibilidad de extenderse en la zona.

Acompañando el incremento de caudal, habrá también un aumento de sedimentos que entrarán a la zona del delta de Matunilla en Barbacoas. Esto implicará que la zona entre el Canal y la Bahía de Barbacoas seguirá siendo un gran depositador de estos sedimentos, con el consecuente avance lento pero continuo del delta sobre la bahía. A largo plazo se esperaría la desaparición por colmatación de algunas ciénagas, (empezando por las más pequeñas y someras), y la formación de otras nuevas en la bahía, la cual siempre ha sido de baja profundidad hacia la línea costera. Es posible que en algunas décadas la Bahía de Barbacoas se convierta en un complejo de ciénagas, como ocurrió en la antigua Bahía de Cispatá; este proceso sin embargo, se puede intervenir y mejorar.

Es posible que el incremento de aguas y sedimentos hacia la zona de Barbacoas implique también un aumento de la productividad de sus ecosistemas, dado que habrá una mayor disponibilidad de nutrientes y materia orgánica. Se esperaría por tanto una mayor producción pesquera de peces y crustáceos. De manera opuesta, la actividad de pesca en la Bahía de Cartagena en Pasacaballos se reducirá debido a que no llegarán los aportes de nutrientes a este sitio.

Así como la zona del Caño Matunilla en Barbacoas se volverá más dulce, (con los cambios reseñados), la zona aguas abajo del sitio donde quedará la esclusa, (posiblemente en el sector de Paracuica), se salinizará. Esto ocurrirá en todo el trayecto del caño Lequerica y en el Canal desde la esclusa hasta Pasacaballos. No habrá por tanto peces de aguas dulces en este sector y en los ecosistemas de manglar se presentará un incremento de las especies más resistentes al estrés salino.

Igualmente, en la parte socioeconómica prácticamente todas las comunidades asentadas a lo largo del Canal del Dique dependen de su dinámica hídrica. La ganadería extensiva, algunos cultivos semitecnificados y los cultivos de pan coger constituyen los sistemas productivos principales. De manera particular, la industria de la camaricultura asentada en los manglares, o en las inmediaciones de éstos, ocupan un reglón importante en la economía privada de la región y del país. Estos cultivadores de camarón que se ubican en el tramo que posiblemente se salinizará, podrían ver reducida su producción o incrementados sus costos por la escasez de agua dulce. Por lo tanto, los cambios en las condiciones de caudal y salinidad a lo largo del sistema tendrá implicaciones ecológicas que se reflejarán en las comunidades humanas.

9.2.3. Efectos Sobre los Ecosistemas Coralinos

Es posible que las aguas dulces cargadas de sedimentos y nutrientes contribuyan en alguna forma al deterioro de los arrecifes de coral en el PNN de Corales del Rosario y San Bernardo. Los efectos pueden ser de varios clases; el aumento de la turbidez del agua, (por sedimentos finos), obstaculiza los procesos metabólicos de los corales; como se sabe los pólipos coralinos mantienen una relación de simbiosis con algas microscópicas llamadas zooxantelas; dichos organismos necesitan de la luz para llevar a cabo sus procesos fotosintéticos y aportar elementos para el crecimiento del esqueleto del coral.

Por otro lado, el aumento de sedimentos en el agua podría taponar progresivamente los orificios de los pólipos, impidiéndoles captar el alimento, expulsar los materiales de desecho

y realizar el intercambio gaseoso. Todo lo anterior se traduciría en la muerte gradual de los corales por aumento de la sedimentación aportada por la mayor cantidad de agua dulce que saldría a la Bahía de Barbacoas y que sería transportada hasta el parque por las corrientes.

Desde otra perspectiva, el aumento de aguas dulces y sedimentos está acompañado de mayores concentraciones de nutrientes, los cuales podrían promover el crecimiento de macroalgas marinas sobre el coral, provocando su muerte por la colonización que haces estas algas sobre las estructuras coralinas.

Los resultados de la modelación marina realizada generan alguna tranquilidad en el sentido de que la afectación por cuenta de los sedimentos del canal del Dique sería limitada, y en ninguna forma sería mayor a la que ya existe en la zona; por el contrario el efecto se puede minimizar con manejo adecuado de los sedimentos en la Bahía.

9.3. CONCLUSIÓN GENERAL

La valoración ambiental cualitativa resulta fundamental en la determinación de los impactos ambientales totales y por supuesto, en la formulación del Plan de Manejo Ambiental. A la luz de los resultados de la modelación matemática y física, así como de las reflexiones y análisis realizadas al interior del equipo de trabajo, la valoración ambiental cualitativa caracteriza y sistematiza la importancia intrínseca de los impactos identificados en términos de su naturaleza, intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, sinergia, acumulación, causa/efecto, periodicidad y recuperabilidad, permitiendo de paso vislumbrar algunos elementos parciales para la toma de decisiones.

- Es evidente que las condiciones de operación actual del Canal del Dique son nocivas para el medio ambiente de la ecorregión y particularmente para su población, además de la falta de presencia del Estado en la ecorregión.
- Aunque todas las alternativas consideradas conllevan bondades y mejoramientos netos importantes para el medio ambiente, la alternativa que involucra la condición actual mejorada + los tres (3) estrechamientos + el sistema esclusa-compuerta en el estrecho de Paricuica (El Recreo) resulta ser la que mas bondades y mejoramientos genera en la ecorregión del Canal del Dique.

Por todo lo anterior, es posible conceptualizar que la alternativa estudiada y seleccionada, denominada en el presente estudio A4, es viable técnicamente, y ambientalmente favorable a la recuperación de los ecosistemas degradados de la zona del Canal del Dique, con lo cual se podría recomendar su paso a diseño final, con la adición de ensayos en modelo físico sobre las condiciones de navegabilidad, y las implicaciones sedimentológicas a lo largo del Canal, referentes a posibles pérdidas de la capacidad de transporte dentro del mismo, que produzcan eventos localizados de deposición a lo largo de los sectores de sección transversal más amplia.

10. RECOMENDACIONES

En concordancia con los resultados obtenidos, y con los principios de precaución, gradualidad, economía y mejoramiento continuo se recomienda:

- La implementación y desarrollo inmediato de la Condición Actual Mejorada, toda vez que es urgente y común a las demás alternativas consideradas. La condición actual mejorada representa un mejoramiento significativo sin grandes inversiones y de paso permite continuar con el estudio de las otras alternativas consideradas, y profundizar en la evaluación de elementos adicionales de la solución.
- Continuar con el proceso in-situ de experimentación e investigación, que permita el monitoreo, seguimiento y evaluación de la condición actual mejorada y por supuesto, su complementación posterior con otro tipo acciones que deberán continuar siendo objeto de evaluación y estudio.
- Cualquier alternativa que se seleccione deberá ser objeto de una Evaluación de Impacto Ambiental que garantice la prevención, eliminación, mitigación y/o control de los impactos que genere, todo ello mediante la formulación del respectivo Plan de Manejo Ambiental. En consecuencia, la alternativa que se implemente debe tener un alto grado de reversibilidad, que pueda ser desmontada fácilmente y a un costo mínimo, si con el tiempo no cumpliera con las expectativas de eficacia y eficiencia requeridas.

En síntesis, se recomienda la implementación no de una alternativa o proyecto óptimo de manejo hidrosedimentológico, sino fundamentalmente de un Plan de Gestión Ambiental del recurso hídrico y de Desarrollo Sostenible para la ecoregión del canal del Dique.

Del contenido de los informes anteriores de la Universidad, y del presente informe de la alternativa final seleccionada, se pueden realizar algunas observaciones y recomendaciones adicionales, que resultan pertinentes para la optimización de la solución final. Las siguientes son algunas sugerencias iniciales que deberán estudiarse y complementarse en el futuro con estudios más detallados.

10.1. ASPECTOS FÍSICOS

Es importante realizar estudios sobre modelo físico de los angostamientos a fin de determinar plenamente los posibles efectos hidrodinámicos sobre la navegación fluvial y algunos aspectos sedimentológicos relacionados con la sedimentación y socavación en las vecindades de los angostamientos.

Es conveniente precisar la localización de la esclusa de Paricuica mediante investigaciones geológicas y geotécnicas in situ.

Es conveniente realizar un levantamiento de canteras y zonas con materiales de relleno apropiados para el relleno de las zonas a angostar.

Se deben estudiar en detalle las características requeridas de la exclusa de Paricuica a fin de permitir una adecuada elaboración de los pliegos de contratación. En especial se deben especificar los canales para navegación local y tránsito de peces y especies acuáticas.

10.2. MANEJO DE SEDIMENTOS EN LA BAHÍA DE BARBACOAS

Se propone realizar la vegetalización con especies de manglares de los playones que se irán formando por la entrada de mayores cantidades de sedimentos. De esta manera se podría aumentar la productividad ecológica de la zona, a la vez que se estabilizarían los sedimentos que entran al delta de Barbacoas. Igualmente, se sugiere vincular grupos comunitarios locales en los procesos de vegetalización y restauración de las áreas de manglar. Esto implicaría el desarrollo de la **silvicultura manglárica** en la región, con la participación de pobladores locales como parte del paquete de proyectos productivos piloto que deberán plantearse y desarrollarse.

Con relación a este punto vale la pena mencionar que Colombia, a través del Proyecto Manglares del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial y llevado a cabo durante los años 1998 al 2004, se desarrolló e implementó la base metodológica para la restauración, la vegetalización y el ordenamiento de las áreas de manglar de la costa Caribe de Colombia. En este sentido las compensaciones o mitigaciones que comprometan a los manglares cuentan con buena información técnica, (ver bibliografía consultada), y con varias comunidades capacitadas en la zona (Pasacaballos, Leticia y Bocacerrada) que podrían participar y beneficiarse de los proyectos que se desarrolle.

10.3. ESTABLECIMIENTO DEL PLAN DE ORDENAMIENTO DEL DELTA DEL CANAL DEL DIQUE

El Delta del Canal del Dique ha sido objeto de varios procesos de ordenamiento en donde sobresalen los siguientes, (ver referencias bibliográficas):

- Zonificación de las áreas de manglar del departamento de Sucre
- Zonificación de las áreas de manglar del departamento de Bolívar
- Declaratoria del Santuario de flora y fauna el “Corchal Mono Hernández”

Cada uno de estos procesos de ordenamiento está ampliamente documentado; incluso algunos de ellos poseen planes de manejo, como es el caso del Santuario de Flora y Fauna el Corchal Mono Hernández de la Unidad Especial del Sistema de Parques Nacionales Nacionales. Igualmente se cuenta con cartografía específica en la que está registrado el ordenamiento, y con varios documentos relacionados en la bibliografía. Todas estas experiencias pueden servir de base para establecer un plan de ordenamiento de la zona de

Barbacoas que aproveche las condiciones generadas por el proyecto de reducción de caudales del Canal del Dique.

10.4. CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA Y SOCIOECONÓMICA DEL ÁREA

Agua y sedimentos son los puntos a considerar y su relación con la conservación de la biodiversidad, los sistemas productivos y el bienestar de las comunidades son los parámetros a evaluar. Por lo tanto será necesario conocer con detalle cada uno de estos parámetros, es decir caracterizar y diagnosticar la biodiversidad y el funcionamiento de los sistemas productivos y estudiar los aspectos socioeconómicos de las comunidades.

La caracterización permitirá definir cuál es la biodiversidad (de ecosistemas o biomas, poblaciones, comunidades y especies), en dónde se localiza y cómo varía. Deberá cuantificarse en términos de extensión o abundancia. Igualmente, con la caracterización física se podrán determinar con precisión los aspectos climáticos, hidrológicos, geomorfológicos, etc. En la parte socioeconómica se deberá evaluar en dónde se localizan, cómo y de qué viven las comunidades humanas.

Toda esta información será fundamental para abordar de la manera más técnica y eficiente posible las actividades que se establezcan en el plan de ordenamiento de la zona del Delta del Canal del Dique.

10.5. MANEJO DE LOS SEDIMENTOS DEL CANAL DEL DIQUE

Este es uno de los puntos más relevantes y que tiene mayores implicaciones, pues el complejo del Canal del Dique desde Calamar hasta el delta en el mar Caribe involucra uno de los sistemas de humedales más importantes de la Llanura de la costa Caribe. Desde el punto de vista de los ecosistemas naturales los humedales, representados por los helobiomas y los limnobiomas, son los dominantes, seguidos por los manglares o halohelobiomas, los corchales y todo el complejo pantanoso del “herbetum” y el “graminetum”. En la parte marina, los corales ubicados en el área de influencia del delta del Canal del Dique también son de una alta diversidad y productividad. Todos estos ecosistemas se verán afectados por los cambios en el caudal y los sedimentos.

Deberá continuarse con la operación y mantenimiento mediante dragado de las trampas de sedimentos en Calamar. Trampas semejantes se podrían instalar a la entrada de los caños Correa y Matunilla.

El proceso de vegetalización del playones en Barbacoas deberá hacerse de manera programada y buscando el establecimiento de las comunidades de manglar en los sitios en que haya mayor deposición de sedimentos. De esta manera se potenciará el papel estabilizador y filtrador de este ecosistema manglárico. La Bahía de Barbacoas se convertiría así en una gran trampa de sedimentos y nutrientes que reduciría los efectos negativos de las aguas que salen del Canal sobre los corales.

En la vegetalización del Barbacoas con manglar se podrá buscar hacer un diseño que permita la circulación lenta del agua por el sistema así construido. Es decir, se deberá hacer una especie de complejo de formaciones de manglar que retenga el mayor tiempo posible el agua que pase por el sistema. De esta forma se logrará un mayor tiempo de retención y en consecuencia una mayor depositación, en especial de sedimentos finos y un mejor aprovechamiento de los nutrientes disueltos en el agua.

10.6. OTRAS RECOMENDACIONES

Para evitar los efectos drásticos de la salinización del sector de Pasacaballos, se sugiere mantener un flujo controlado de agua dulce hacia esta zona. Este flujo podría ser el que se obtenga de un pequeño canal que a la vez permita el tráfico de pequeñas canoas y embarcaciones con motor fuera de borda.

Durante el periodo de trabajo de la presente alternativa, Cormagdalena, con el aval del ministerio del transporte y a petición de la Universidad, conformó un Panel internacional de expertos compuesto por los profesores Marcelo García, de la Universidad de Illinois, USA; Gerhard Jirka, de la Universidad de Karlsruhe, en Alemania, y Allen Bateman, de la universidad política de Cataluña, para que realizarán un análisis y evaluación de los trabajos realizados por la Universidad hasta la fecha, y se pronunciaran sobre la problemática del canal del Dique en relación con las numerosas alternativas de control que se han previsto. El Panel, con la colaboración especial de las directivas de la Asociación Internacional de Investigaciones Hidráulicas, (IAHR), aprovechó además la realización en Cartagena de XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, entre el 2 y el 6 de septiembre de 2008, para realizar un Foro público sobre las obras del Canal del Dique, y presentó un informe final que está contenido en el Anexo G del presente informe.

El informe del Panel Internacional de Expertos abunda en consideraciones muy serias y muy interesantes sobre la problemática del canal, y es ampliamente favorable al análisis realizado por la Universidad en atención a la complejidad de las interrelaciones hidrológicas, hidráulicas y ambientales de la zona. Sus conclusiones están en la línea de la solución prevista, y sus numerosas sugerencias son dignas de análisis para la complementación y ampliación de los trabajos que se derivan del presente estudio.

REFERENCIAS

- Ambassade de France en Colombie, Mission Economique, Fondo de studios y Ayuda al Sector Privado, FASEP-Etudes. "Restauración del Canal del Dique - Informe Final", Bogotá, Junio de 2007.
- Atlas Cartográfico de los Océanos y Costas de Colombia. Dirección General Marítima – DIMAR. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas – CIOH. Publicación No. 3007. Segunda Edición
- Beven, K. J. y Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration y uncertainty prediction, *Hydrological Processes*, 6, 279-298.
- Boada y Sáenz (2007). Modelación Preliminar con HEC-RAS del efecto hidráulico de una alternativa de reducción de la sección del Canal del Dique mediante espolones de enrocado. Informe Final.
- Camacho, L. A., Diaz Granados, M., (2003). Metodología para la Obtención de un Modelo Predictivo de Transporte de Solutos y Calidad del Agua en Ríos – Caso Río Bogotá, *Seminario Internacional la Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, Agua 2003*, Cartagena.
- Camacho, L. A., Lees, M. J., (1999) Multilinear discrete lag-cascade model for channel routing, *J. of Hydrology*, 226, pp. 30 – 47
- Camacho, L. A., Lees, M. J., (2000) Modelación del transporte de solutos en ríos bajo condiciones de flujo no permanente: un modelo conceptual integrado, *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Córdoba, Argentina, Tomo I, pp. 43 – 54.
- Camacho, L. A., Rodríguez, E. A., Pinilla, G. A., (2008). Modelación integrada del Canal del Dique y su sistema lagunar. XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología.
- Camacho, L.A., (1997). Extension of the QUASAR water quality model to incorporate dead zone mixing concepts, MSc Thesis, Imperial College of Science Technology and Medicine, Londres.
- Camacho, L.A., (2000). Development of a hierarchical modelling framework for solute transport under unsteady flow conditions in rivers. PhD Thesis, Imperial College of Science Technology and Medicine, Londres.

CNR Compagnie Nationale du Rhone. (2006). FASEP – Restauracion del Canal del Dique. Informe de consolidación.

COORMAGDALENA-UNAL (2007a) "Estudios e Investigaciones de las obras de restauración ambiental y de navegación del Canal del Dique", Informe Final, Bogotá.

COORMAGDALENA-UNAL (2007b) "Modelación matemática, hidráulica y de calidad del agua del Canal del Dique", Informe CM-CD-07, Bogotá.

COORMAGDALENA-UNAL (2007c) "Aspectos climáticos e hidrológicos de la ecorregión del Canal del Dique", Informe CM-CD-04, Bogotá.

COORMAGDALENA-UNAL (2007d) "Estado limnológico de la ecorregión del Canal del Dique", Informe CM-CD-06, Bogotá.

DíazGranados, M.,A., Camacho L.A., Ordoñez, J.I., Deeb, A. (1992) Modelación del balance hídrico y salino de lagunares costeros. XV Congreso Latinoamericano de Hidraulica. Cartagena.

Díaz-Granados, M.A., Camacho L.A., Maestre, A. (2001) Modelación de balances hídricos de ciénagas fluviales y costeras colombianas. *Revista de Ingeniería Facultad Ingeniería Universidad de los Andes*, No. 13, p 5-11. Bogotá

ELCOM Model, Centre for Water Research de la Universidad de Australia Occidental.

Estación meteorológicas aeropuerto de Cartagena 1977-2000. IDEAM. Ministerio de Medio Ambiente.

Estudios e Investigaciones de las Obras de Restauración Ambiental y de Navegación del Canal del Dique". Universidad Nacional de Colombia. 2007

Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S.

Langbein,W.B. "Hydraulics of River channels as Related to Navigability", U.S. Geological Survey, Water Supply Paper No. 1539-W, 1962. U.S. Government Printing Office.

Lees, M. J. y Wagener, T., (2000). Monte-Carlo Analysis Tool (MCAT) v.2, User Manual, Civil and Environmental Engineering, Imperial College of Science Technology and Medicine.

Lees, M.J., Camacho, L.A., Whitehead, P., (1998) Extension of the QUASAR river quality model to incorporate dead-zone mixing, *Hydrology and Earth System Sciences*, 2, pp. 353-365.

Martin, J. L. y McCutcheon, S: C. Hydrodynamics and transport for water quality Modeling. New York, Lewis Publishers, 1999.

Mesa O., G. Poveda, L.F. Carvajal, (1997). *Introducción al Clima de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultad de Minas.

Michael Hopper. XTide32 Copyright (C), 1999.

Ordóñez, J. I., Cubillos, C. E., Forero, G., (2008). Balance Hídrico y Sedimentológico del Canal del Dique. XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología.

Ordóñez, J. I., Cubillos, C. E., Medina, E., (2008). Estudio Alternativas para el Control Sedimentológico del Canal del Dique. XVIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología.

Poveda G. (2004). La Hidroclimatología de Colombia: Una Síntesis desde la Escala Interdecadal hasta la Escala Diurna. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 28 (107): 201-222.

Priestley, C.H. y R.J., Taylor (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. Monthly Weather Rev. 100 pp 81-92

Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, Roy Jenne, Dennis Joseph. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. Bulletin of the American Meteorological Society, 77 (3), pp. 437–471, 1996

Sistema de Modelado Costero – SMC. Universidad de Cantabria. 2002

UNIVERSIDAD DEL NORTE - INSTITUTO DE ESTUDIOS HIDRÁULICOS Y AMBIENTALES DE LA UNIVERSIDAD DEL NORTE (2003) Bajo Canal del Dique. Caracterización Hidráulica y Sedimentológica. Informe Final. Barranquilla: UNINORTE-IDEHA.

Universidad del Norte, Instituto de Estudios Hidráulicos y Ambientales de la Universidad del Norte – IDEHA (2003). Caracterización Hidrológica del Canal del Dique – Ideha-E-063-014-03

Universidad Nacional de Colombia, Laboratorio de Ensayos Hidráulicos (2007). Estudios e Investigaciones de las Obras de Restauración Ambiental y de Navegación del Canal del Dique. Informe Aspectos Climáticos e Hidrológicos y Anexo correspondiente.

Whitehead, P. G., Williams R. J. and Lewis D. R. (1997). Quality simulation along river systems (QUASAR): Model theory and development, *The Science of the Total Environment*, 194/195, 447-456.

<http://www.digitalglobe.com> [Visitada, 8 septiembre de 2008].

<http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/> U.S. Army Corps of Engineers (2005). Modelo HEC-HMS v3.0.0. Manual del usuario.

<http://www.shom.fr>. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Marina en Francia

<http://www.wxtide32.com> WXTide32 - a free Windows tide and current prediction program

ANEXO A: ANÁLISIS HIDROCLIMATOLÓGICOS

ANEXO B: SECCIONES TRANSVERSALES ACTUALIZADAS DEL CANAL DEL DIQUE

ANEXO C: MODELACIÓN DEL CANAL DEL DIQUE CON HEC-RAS

ANEXO D: OBRAS ADICIONALES EN EL CANAL DEL DIQUE

ANEXO E: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA

ANEXO F: EFECTOS ECOLÓGICOS DE LA DERIVACIÓN DE AGUAS Y SEDIMENTOS HACIA LA BAHÍA DE BARBACOAS

ANEXO G: LA NAVEGACIÓN EN EL CANAL DEL DIQUE

ANEXO H: COMENTARIOS AL PROBLEMA MEDIOAMBIENTAL Y SEDIMENTOLÓGICO

ANEXO I: ANEXOS EN MEDIO DIGITAL

ANEXO I.1.: INFORMACIÓN HIDROCLIMATOLÓGICA

ANEXO I.2: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN MATEMÁTICA