

DISEÑO FINAL DE LAS OBRAS DE CONTROL SEDIMENTOLÓGICO DEL CANAL DEL DIQUE

Jaime Iván Ordóñez
I. C., M. Sc., Dr. Eng.
Profesor Asociado-Bogotá
jiordonezo@unal.edu.co

Luís Alejandro Camacho
I. C., M. Sc., Ph. D.
Profesor Asociado-Bogotá
lacamacho@unal.edu.co

Andrés Gómez-Giraldo
I. C., M. Sc., Ph. D.
Profesor Asociado-Medellín
eagomezgi@unalmed.edu.co

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, SEDE BOGOTÁ - LABORATORIO DE ENSAYOS HIDRÁULICOS
Carrera 30 No. 45 – 03 Edificio 408
Teléfono: 57 (1) 316 5570, 316 5000 extensiones: 13411 ó 13415
Correo electrónico: labeh_fibog@unal.edu.co

RESUMEN

La ecorregión del Canal del Dique, en Colombia, está ubicada en la parte occidental del delta del Río Magdalena en su desembocadura al mar Caribe. El área de la cuenca es de 4.400 km², y está delimitada al norte y al occidente por el Mar Caribe y al oriente por el Río Magdalena; contiene cuerpos de agua de marismas y pantanos salobres con vegetación riparia, más de 213 km² de espejos de agua y ciénagas de importancia ecológica invaluable, y unos 870 km² de zonas bajas inundables de carácter deltaico. El Canal fue abierto por los españoles en 1650, para conectar el río Magdalena, desde el interior de Colombia, con la bahía de Cartagena sin pasar por la desembocadura del río en el mar Caribe y, a través de los años, la descarga de sedimentos a la bahía se ha convertido en un problema que requiere control. Después de estudiar numerosas alternativas de obras de regulación, así como los efectos que estas obras podrían traer, tanto para el balance sedimentológico de toda la región, como sobre la ecología del sistema cenagoso y también del sistema terrestre y fluvial, el gobierno nacional de Colombia, mediante un detallado estudio por el laboratorio de Ensayos hidráulicos de la Universidad Nacional, ha propuesto un diseño final basado en la reducción del caudal de entrada al canal, mediante la reducción de la sección transversal del mismo en tres sitios diferentes a lo largo de su recorrido, en sectores de 5 km cada uno, más la construcción de una compuerta-esclusa en el sector final del canal, en el sitio de Paricuica, entre los Caños Matunilla y Lequerica que drenan hacia la bahía de Barbacoas. Esta solución ha probado cumplir con los requerimientos desde el punto de vista hidráulico y ambiental, para resolver los problemas de sedimentación sin perjudicar el medio ambiente regional.

ABSTRACT

The ecorregión of the Canal del Dique in northern Colombia is located in the western part of the delta of the Magdalena River, near its mouth in the Caribbean Sea. The area has some 4.400 km², bordering north and west with the Caribbean, and west with the Magdalena River, It is conformed by lowlands, mangrove swamps and salt marshes of riparian vegetation, more than 213 km² of water surfaces and wetlands of great ecological significance, and some 870 km² of deltaic wetlands. The channel was created by the Spaniards in 1650, to connect the interior part of Colombia, through the Magdalena River, with the bay of Cartagena without the perils of navigating the treacherous waters of the river mouth at Barranquilla, in the Caribbean Sea. Over the years, the discharge of sediments to the bay of Cartagena has become a problem that must be dealt with. After studying a number of different alternatives to control the volumes of sediment entering the canal, and their effects on the sediment balance of the entire system, as well as the ecological implications of the operation of these works, the Hydraulics laboratory of the national University of Colombia in Bogotá has proposed a solution based in the reduction of the water intake to the canal by means of a series of three constrictions to the canal cross section along reaches of 5 to 6 kilometers in length each, plus the construction of a navigation sluice downstream, near K104 of the total length of 117 Km of the Channel, in the site called Paricuica, between the Matunilla and Lequerica channels which drain into Barbacoas Bay. This solution has proved to meet the hydraulic and environmental qualifications to solve the sedimentation problems without damaging the regional ecology.

INTRODUCCIÓN

La ecorregión del Canal del Dique está ubicada en la parte occidental del delta del Río Magdalena en su desembocadura al mar Caribe. El área de la cuenca es de 4.400 km², y está delimitada como se muestra en la Figura 1. Contiene cuerpos de agua del tipo de marismas y pantanos salobres con vegetación riparia, más de 213 km² de espejos de agua y ciénagas de importancia ecológica invaluable, y unos 870 km² de zonas bajas inundables cuyos suelos se renuevan anualmente con los materiales sólidos de desborde del Canal, como sucedía en el valle del Nilo miles de años antes de la construcción de la presa de Asuán.

Esta zona deltáica ha sido abandonada por el Río Magdalena en el último periodo geológico, (10,000 años), pero aún conserva un carácter de zona baja inundable, una tendencia a la penetración de las aguas marinas hacia el interior, y frecuentes invasiones de agua fresca del río durante los periodos de inundación. El Canal fue abierto por los españoles en 1650, para conectar el interior de Colombia con la fortaleza de Cartagena de Indias sin pasar por la desembocadura del Río en el mar Caribe, y funcionó inicialmente conectándolo con la antigua bahía de Matuna, y ésta con la de Cartagena a través del Caño del Estero. Ya en la época moderna, en 1934, cuando las necesidades de navegación y la disponibilidad de equipos para el corte de materiales duros lo permitieron, se realizó el corte de Paricuica, cerca de la población de El Recreo, con lo cual las aguas del Canal llegaron directamente a la bahía por la población de Pasacaballos, *Figura 1*.

Obras de mejoramiento en el canal

Desde 1650 hasta la fecha, se han realizado numerosas rectificaciones y dragados mayores de relimpia del Canal; en la época más reciente, desde 1934, se han realizado los cambios más importantes para mejorar la vía navegable. La última intervención, realizada en 1984-85 dejó un canal de 115 Km. de longitud, con ancho aproximado de 80 a 90 m, profundidades variables entre 3.0 y 10.0 m, y un caudal medio de 540 m³/s, mayor al que se daba anteriormente, del orden de 350 m³/s. Los proyectos de mejoramiento que se han realizado no contaron nunca con suficiente análisis hidráulico, debido a la carencia de información hidrológica, hidrométrica y sedimentológica, y del efecto de los cambios hidrológicos e hidrosedimentológicos producidos sucesivamente, cuyas consecuencias sobre los ecosistemas de los cuerpos de agua asociados nunca fueron investigadas.

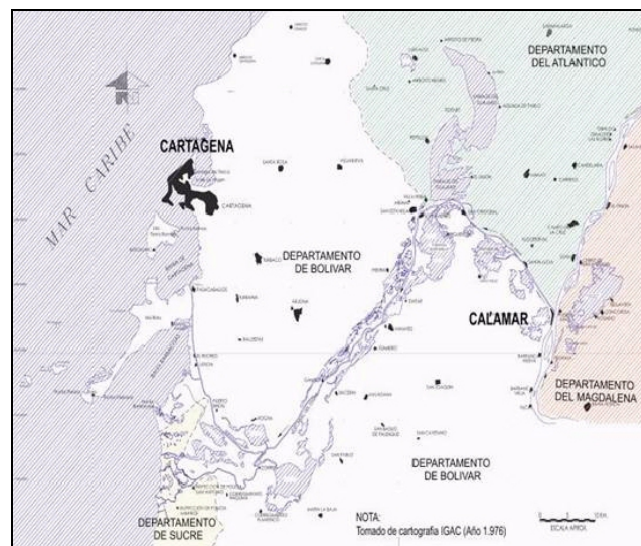


Figura 1. Localización de la ecorregión del Canal del Dique en Colombia.

A pesar de lo anterior, existen claras evidencias de efectos favorables sobre la navegación, y el mejoramiento de las condiciones ambientales, que se manifiestan por la creciente ocupación humana, debido sobre todo al progresivo desalajo del agua salobre de la zona, que ha convertido la región en un ambiente de agua dulce, más apropiado a la colonización humana que la anterior condición de ambiente marino y salobre.

Hoy en día existen en la región más de 17 municipios habitados por una población cercana a 400.000 habitantes, los cuales derivan su sustento de la agricultura, la ganadería y la pesca, y que nutren sus sistemas de acueducto con agua del Canal y del sistema cenagoso asociado. La propia ciudad de Cartagena, con 1.1 millones de habitantes, utiliza para su abastecimiento el agua de la ciénaga de Juan Gómez, en un sector que era salino hace menos de 100 años.

La recuperación de las zonas costeras es hoy en día tan importante, que la frontera salina no sobrepasa el K100, (a 5 Km. de la desembocadura del Canal), con lo cual sólo un 10% del área posee un ambiente salino, mientras que en el año de 1650, presumiblemente, sería más del 70% del área. Aún hoy, amplios sectores de la zona poseen niveles freáticos salobres, y por lo menos la ciénaga del Guájaro, convertida en embalse, cerca del K10, es decir cerca del río Magdalena, posee altas concentraciones de sal, por la inundación de suelos salinos.

Sedimentación en las bahías de Cartagena y Barbacoas

El Canal fue construido por los españoles en 1650, para conectar el interior de Colombia con la fortaleza de Cartagena de Indias sin pasar por la desembocadura del río en el mar Caribe. Ya en la época moderna, en 1934, cuando las necesidades de navegación y la disponibilidad de equipos para el corte de materiales duros lo permitieron, se realizó el llamado corte de Paricuica, cerca de la población de El Recreo, con lo cual las aguas del Canal llegaron directamente a la bahía por la población de Pasacaballos.

La última intervención, realizada en 1984-85, dejó un canal de 117 km de longitud, con ancho aproximado de 80 a 90 m, profundidades variables entre 3.0 y 10.0 m, y un caudal medio de 540 m³/s, mayor al que se daba anteriormente, del orden de 350m³/s. A pesar de que existen evidencias de efectos favorables de esta intervención sobre la navegación, y el mejoramiento de las condiciones ambientales, sobre todo, por el progresivo desalajo del agua salobre de la zona, la descarga de sedimentos del Canal del Dique ha ido aumentando como consecuencia del aumento de los caudales, con los sucesivos proyectos de mejoramiento de la navegación. Este efecto fue identificado por primera vez en 1973 por la Misión Técnica Colombo – Holandesa (MITCH), como un problema potencial para las bahías de Cartagena y Barbacoas, (MITCH, 1973). Cabe advertir que el efecto sobre la bahía de Cartagena se ha ido agravando con el paso del tiempo debido al aumento paulatino del caudal en el Canal, y a la inadecuada disposición de los sedimentos dragados desde la rectificación de 1984-85.

Con todo, el Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad nacional de Colombia, LEH-UN, (LEH-UNC. 2007), ha encontrado que el problema sedimentológico es todavía controlable, desvirtuando escenarios catastróficos como los que algunos continúan vaticinado para la bahía de Cartagena con base en impresiones personales y en estudios incompletos.

A partir de 1997 el Ministerio del Medio Ambiente de Colombia, ordenó el estudio de las acciones necesarias para restaurar los ecosistemas degradados del Canal, originando una serie de estudios que revivieron las ideas de controlar los flujos de agua y sedimentos mediante estructuras hidráulicas; inicialmente se plantearon cuatro alternativas :

- I. Una esclusa en Calamar, y otra en el K80.
- II. Una esclusa de navegación en Calamar, únicamente.
- III. Una esclusa y una compuerta en el medio Canal, K36.
- IV. Exclusa en Calamar + Apertura del caño Viejo.
- IV-A Exclusa + compuerta en Calamar.

De este análisis se decidió pasar a diseño, las alternativas IV y la IV-A. La IV, que fue el esquema básico inicial, pretendía cerrar el Canal mediante una esclusa en Calamar, y hacer la apertura del caño Viejo para permitir la entrada de agua en una cantidad menor, similar a la que entraba antes del dragado de 1984, (del orden de $350\text{m}^3/\text{s}$). La Universidad generó una serie de nuevas alternativas, así :

- **Alternativa 0: Condición actual**, (estado de referencia).
- **Alternativa 1:** Exclusa en Calamar, (IV Uninorte).
- **Alternativa 2: Condición actual mejorada**, (mejoramiento de interconexiones Canal-ciénagas, optimización de los dragados, sin regulación de caudal).
- **Alternativa 3: Control sedimentológico**, (Excluser).
- **Alternativa 4: Control sedimentológico**, (compuerta y esclusa en Calamar, Alt. IV-A).

Estas alternativas se analizaron anteriormente, (1), (2), sin que se obtuviera una solución totalmente aceptable; sin embargo, y como complemento a su informe final de 2007, el laboratorio ha propuesto una solución final basada en el angostamiento de la sección del canal a lo largo de tres sectores de 5 Km cada uno, más la compuerta-exclusa de Paricuica, al final del canal, contando hasta la fecha con la aprobación de todos los estamentos técnicos y oficiales de Cartagena. Este diseño es el motivo de la presente publicación.

Balance hídrico y sedimentológico del canal del dique

Las figuras 2 y 3 muestran el resultado de los cálculos realizados para determinar el balance sedimentológico actual del Canal. Se ha utilizado la información hidrométrica y sedimentológica de las cuatro estaciones disponibles en el Canal, en las abscisas K07, K57, K80, y K82, (desde el inicio del Canal en Calamar), y los resultados de la modelación hidrodinámica del sistema, reportados en otras publicaciones, (CEI Ltda., 1976), (UNINORTE, 2001) y (ESTUDIOS Y ASESORÍAS. 2000). El volumen total de agua que entra al Canal es de 45 Mm^3 , de los cuales sólo el 24% llega a la bahía de Cartagena, 26% a la bahía de Barbacoas, 14% al mar por el caño Correa y el remanente 36% es aprovechado dentro del sistema cenagoso por la población, los distritos de riego y los ecosistemas.

El volumen de sedimentos que entra al Canal se ha estimado en 13.1 Mton/año . El sedimento fino en suspensión entra en la misma proporción de derivación del agua, que es en promedio del 7.54%, en tanto que los materiales más gruesos se derivan en una proporción cercana al doble, (15%), de acuerdo con las curvas mencionadas, y con la experiencia en la modelación física de la entrada del Canal, (LEH-UNC., 2007). El balance sedimentológico indica que sólo 1.5 Mton/año de materiales consistentes en limos y arenas muy finas llegan anualmente el delta del Canal del Dique en Pasacaballos, y otros 0.5 Mton/año de materiales, en el rango de limos muy finos, arcillas y coloides, ingresan a la bahía de Cartagena y participan en la formación de una pluma turbia superficial, que esparce esos sedimentos en toda el área de la bahía de más de 86 Km^2 , sin producir espesores de depósito en zona alguna, que afecten la navegación marítima o fluvial.

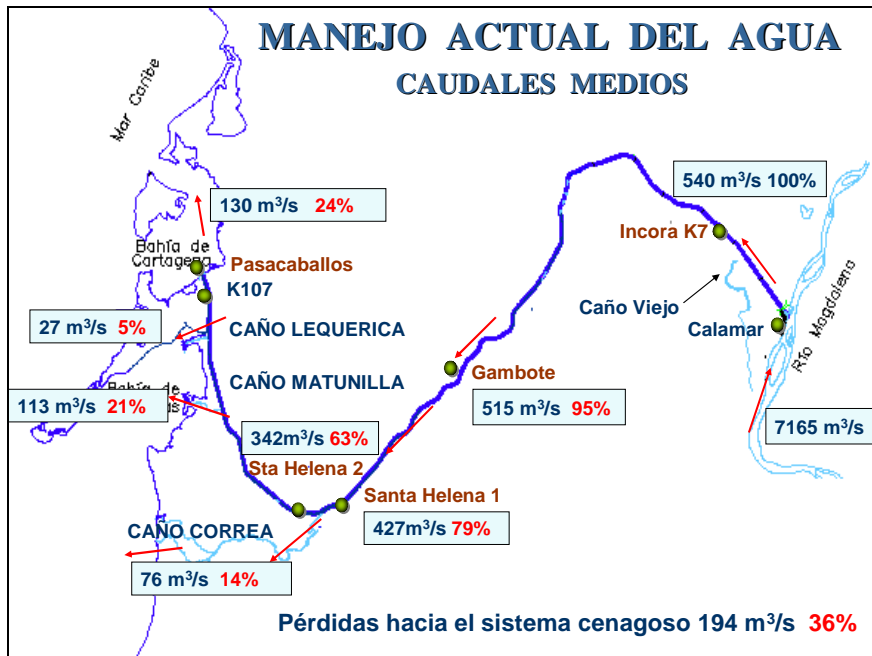


Figura 2. Manejo actual del agua en la zona del Canal del Dique.

En la bahía de Barbacoas, 1.7 MTon/año de materiales se quedan actualmente en los deltas de los caños Matunilla y Lequerica, y 0.65 MTon/año de materiales finos se esparcen por la Bahía al impulso de las corrientes marinas, viajando predominantemente al sur – occidente y abasteciendo las playas entre Cartagena y el golfo de Morrosquillo.

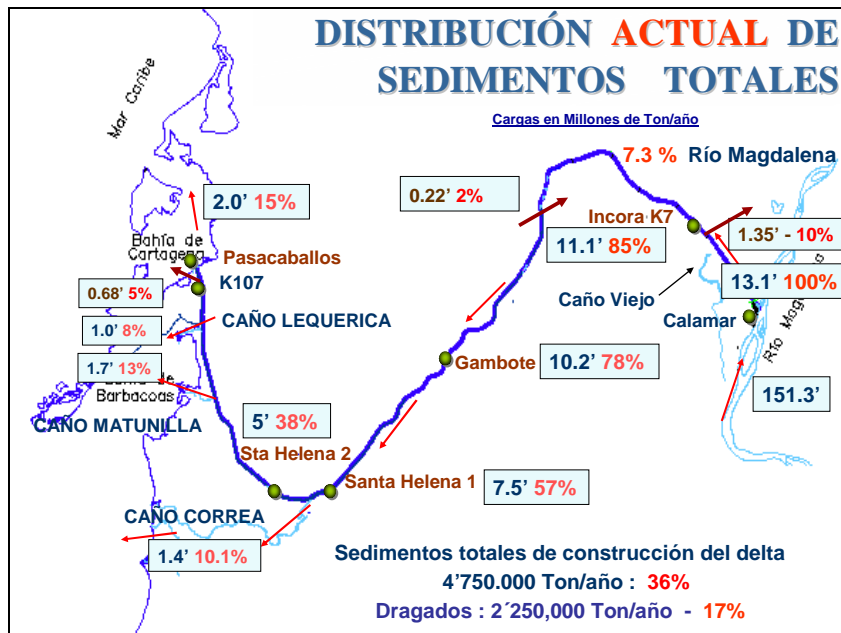


Figura 3. Distribución actual de sedimentos totales.

La tercera entrega al mar de las aguas del Canal del Dique ocurre a través del Caño Correa, de 40Km de longitud, el cual se desprende en el K80 del Canal, y lleva sus aguas directamente al mar mediante las bocas de Labarcé, Benítez y Boca Cerrada. El total de sedimentos es de 1.4 MTon/año los cuales ingresan directamente, por la deriva litoral, hacia el Golfo de Morrosquillo al sur occidente.

OBJETIVOS

El presente trabajo, (LEH-UN, 2009), tuvo como propósito realizar el diseño final de las obras propuestas para el control hidrosedimentológico del Canal, mediante una alternativa diferente, que incluye la disminución del caudal en el canal, pero manteniendo los niveles a lo largo del mismo para evitar problemas ambientales por desecamiento de las ciénagas, y el cierre final mediante una esclusa-compuerta, al final del recorrido del canal.

METODOLOGÍA

Se estudió el comportamiento de las condiciones hidráulicas del canal realizando la contracción de la sección transversal de flujo a lo largo de tres tramos seleccionados de modo que sean completamente rectos, (Figura 4), para efecto de la visibilidad de las embarcaciones. Las longitudes resultantes fueron de 4 a 6 Km por cada tramo, con un total de tres contracciones entre el K0+000, y el K80+000; se utilizó el modelo hidrológico-hidrodinámico y de calidad del agua, desarrollado en la etapa de análisis de alternativas, para establecer las posibilidades de este esquema, con o sin la obra complementaria de una compuerta al final del canal, para obturar totalmente la entrada de sedimentos Cartagena.



Figura 4. Esquema de la solución final para el Canal del Dique

Dado que los sedimentos que no ingresan a la Bahía serían desviados por los caños de salida hacia la Bahía de Barbacoas y hacia las playas al suroeste de Cartagena, se realizó también la modelación del sector marino, para establecer si estos sedimentos podrían de alguna forma afectar las formaciones coralinas de las islas del Rosario, archipiélago de gran importancia turística y ecológica a solo 80 millas de la costa frente a la ciudad.

MODELACIÓN MATEMÁTICA DE ALTERNATIVAS

El análisis de las condiciones de funcionamiento del Canal bajo las diferentes alternativas de estudio, se realizó mediante un modelo matemático acoplado que considera los balances hidrológicos del sistema cenagoso, los flujos en el canal del dique y las condiciones de calidad del agua en diferentes puntos del sistema.

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.

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 simulación de alternativas de disminución de caudal se realizó con 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). Dichos valores permitieron mejorar las condiciones del Índice de Estado Limnológico Parcial IELP, desarrollado en el estudio previo para juzgar la calidad ambiental de estos cuerpos de agua en cada alternativa, 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).

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.

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, Cd , con el cual se modela el caudal de desborde lateral de cada subtramo del Canal del Dique hacia las ciénagas.

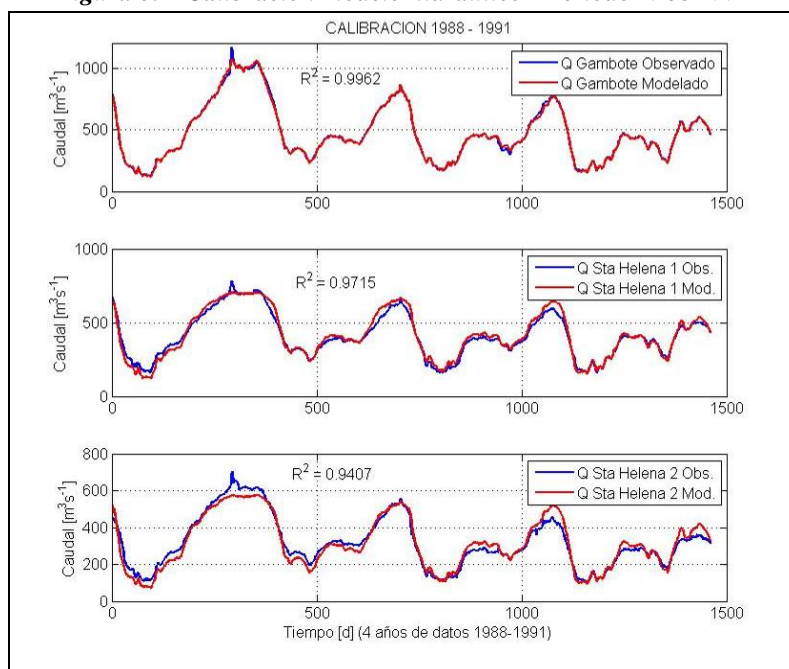
Los resultados de la calibración del modelo por tramos del Canal del Dique entre estaciones hidrométricas se resumen, en la Tabla 1. Como función objetivo de bondad de ajuste se presenta el coeficiente de determinación de Nash y Sutcliffe, (1970). Los resultados se presentan en forma gráfica en la Figura 0 para el periodo de calibración en los tramos Incora K7 - Gambote, Gambote - Santa Helena 1 y Santa Helena 1 – Santa Helena 2.

Tabla 1. Resultados de calibración del modelo hidráulico

Tramo	Calibración R^2
Incora 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 Incora 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 Incora 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 0. Calibración modelo hidráulico - Periodo 1988-1991

Se ensayaron 6 nuevas alternativas así :

Alternativa 1 : Condición actual.

Alternativa 2 : Condición actual mejorada más esclusa en Paricuica.

Alternativa 3 : Condición mejorada, más tres contracciones de la sección del Canal.

Alternativa 4 : Condición mejorada, más 3 contracciones, más esclusa en Paricuica.

Alternativa 5 : Condición mejorada, más esclusa en K116, abajo del caño Lequerica.

Alternativa 6 : Condición mejorada más 3 contracciones más esclusa en el K116.

RESULTADOS

Se propone realizar las contracciones mediante enrocado a ambos lados del canal, con base en resultados positivos de un trabajo previo, realizado en 1998, en un sector de 200 m de largo donde se rellenó tanto la margen como una zona extensa de socavación en el lecho, que cubría una tercera parte del ancho del fondo del canal, en la zona de un cruce subfluvial para un oleoducto de 20 pulgadas de diámetro. El canal angostado tiene un ancho del fondo de 40m, y taludes, entre 1.5:1 y 3:1, con rellenos de granulometría variada y D50 de 15 cm.

El caudal medio de $540\text{m}^3/\text{s}$ se reduce hasta valores de 350 a $390\text{m}^3/\text{s}$, reduciendo la entrada total de sedimentos en un 35% respecto de la condición actual. Igualmente, se disminuye la entrada de sedimentos gruesos y finos a las dos bahías en un porcentaje del 37%. Las tablas 2 y 3 presentan los cambios hidráulicos que se producen entre la condición actual y la condición con contracciones.

Tabla 2. Características hidráulicas del canal original

Q (mcs)	Y (m)	V (m/seg)	F	So E-05	S ₁ E-05	S ₂ E-05
55	2.40	0.27	0.06	2	2	14
230	4.65	0.56	0.09	4	4	17
415	6,05	0.75	0.10	6	6	23
640	7.35	0.92	0.12	7	7	17
885	8.5	1.07	0.13	8	8	26

Los aumentos de velocidad son apreciables entre las secciones normales y las secciones contraídas, subíndices 1 y 2 de las tablas 2 y 3, pero es necesario recordar que en la situación actual los caudales son más altos, llegando hasta 1200 mcs durante parte del año.

Tabla 3. Características del canal modificado

Q (mcs)	Y ₁ (m)	V ₁ (m/seg)	F ₁	Y ₂ (m)	V ₂ (m/seg)	F ₂
55	2.30	0.34	0.06	2.10	0.62	0.14
230	4.63	0.63	0.10	4.35	1.12	0.17
415	6.11	0.75	0.10	5.81	1.55	0.20
640	7.50	0.90	0.12	7.07	1.85	0.18
885	9.11	1.04	0.12	8.47	2.18	0.23

Las profundidades en e sistema cenagoso se mantienen en los mismos niveles actuales, y en algunos casos aumentan ligeramente. Otros resultados de la modelación son como sigue :

Derivación de sedimentos

Al igual que para todas las demás alternativas estudiadas, se analizó el problema en términos de dos tipos de sedimentos: los gruesos y los finos. Los gruesos comprenden arenas medias, finas y muy finas, limos gruesos y medios, cuyas velocidades de asentamiento son altas, (entre 6 cm./s y 0.06 cm./s), y por lo tanto se depositan rápidamente cuando la corriente pierde velocidad a la llegada a las bahías, y típicamente se encuentran formando parte del delta de Pasacaballos y de los deltas de los caños Matunilla y Lequerica. Los sedimentos finos comprenden limos finos y arcillas, cuya velocidad de asentamiento es inferior a 0.02 cm./s, que les permite llegar hasta los cuerpos de agua y distribuirse en forma más o menos uniforme en las bahías, sin formar acumulaciones localizadas.

La solución diseñada, con los angostamientos y la esclusa de Paricuica, permite una reducción en los caudales medios de $540\text{m}^3/\text{s}$ a valores entre 350 y $390\text{m}^3/\text{s}$, en forma similar a la solución con esclusa en Calamar, reduciendo a su vez la entrada total de sedimentos en aproximadamente un 35% respecto a la condición actual. Según los resultados de los modelos, se disminuye la entrada de sedimentos gruesos y finos a la bahía de Barbacoas en un 37%, y a la Bahía de Cartagena en un 100%. La reducción del caudal causa como es lógico esperar una reducción de la capacidad de transporte del Canal, pero esta reducción debe ser compensada por la disminución de la carga derivada y el aumento de los caudales de desborde, de tal manera que, si bien debe haber un periodo de reajuste morfológico a lo largo del canal, no se espera en principio que haya problemas de sedimentación a lo largo del mismo. De todas maneras, será necesario durante el diseño final ajustar los volúmenes de dragado en Calamar, y en las vecindades de la esclusa de Paracuica, para minimizar los riesgos de sedimentación en el interior del Canal.

La Exclusa de Paricuica

La inclusión de una esclusa en El Recreo, en el tramo del Canal entre los caños Matunilla y Lequerica, sugerida inicialmente por el LEH-UN en reemplazo de la considerada anteriormente en el estrecho Rocha-Correa que es claramente inadecuada, permite impedir totalmente el paso de sedimentos hacia la Bahía de Cartagena, actuando directamente sobre los materiales finos, a cambio de enviar toda la carga sólida hacia la bahía de Barbacoas y hacia el mar por el caño Correa. Esta esclusa manejará menores caudales y menores diferencias de nivel que la de Calamar, y estará localizada en el único sector del Canal con suelos adecuados para la cimentación de grandes obras, siendo, por supuesto, de costo inferior a la de Calamar.

Debido a que las obras de control en el canal modifican el caudal líquido y sólido que sale al Mar Caribe por los caños Correa, Matunilla y Lequerica, fue necesario verificar el impacto que se generaría en el ambiente marino. Se puso especial atención en el archipiélago de las Islas del Rosario que es un área coralina de gran riqueza ecológica sensible a la concentración de sedimentos en el agua. Este análisis se limitó por el momento, a evaluar los cambios en el patrón de transporte de sedimentos que se generarían como resultado de cambiar el caudal líquido que sale al Mar Caribe por los caños; no se realizó un estudio de impacto real sobre el ecosistema debido a que no se disponía de la información necesaria para ello. Se partió de la premisa de que un mayor transporte de sedimentos hacia las Islas del Rosario generaría un impacto negativo sobre ellas.

Los cambios en el patrón de transporte en el Mar Caribe generados como resultado de las intervenciones en el Canal del Dique, se evaluaron mediante simulación numérica utilizando el modelo hidrodinámico ELCOM, (Estuary, Lake and Coastal Ocean Model), desarrollado por el Centre for Water Research de la Universidad de Australia Occidental; ELCOM permite simular los campos tridimensionales de velocidad, temperatura y salinidad al resolver las ecuaciones de Navier-Stokes y de transporte de especies escalares promediadas según la técnica de Reynolds y bajo la aproximación hidrostática, Hodges et al., (2000). El modelo discretiza las ecuaciones sobre una malla en coordenadas cartesianas y las soluciona utilizando el método semi-implícito en diferencias finitas de Casulli y Cheng (1992).

ELCOM permite incorporar el efecto de la marea, de los afluentes, del viento y de todos los agentes forzantes de la hidrodinámica estuarina para estimar la respuesta del estuario y su evolución en el tiempo. El modelo se validó mediante información recolectada en una sola campaña de campo especialmente diseñada y realizada para ello.

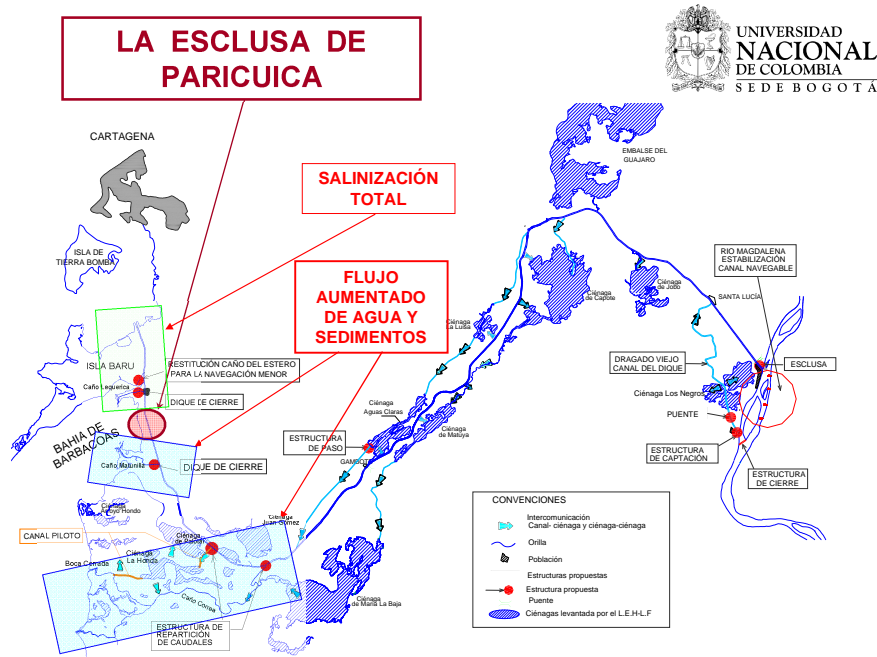


Figura 6. Efectos de la Esclusa de Paricuica

La zona de estudio comprende la porción del Mar Caribe centrada en la Bahía Barbacoas, localizada al sur de la Bahía de Cartagena. La Figura 7 muestra la localización de Bahía Barbacoas, las bocas de los caños Correa, Matunilla y Lequerica, y las Islas del Rosario. El clima se caracteriza por el régimen de los vientos alisios, cuya intensidad y dirección dominante varían con el desplazamiento de la zona intertropical de convergencia, y se ven modificados por procesos de meso escala como el ENSO, (Poveda, 2004).

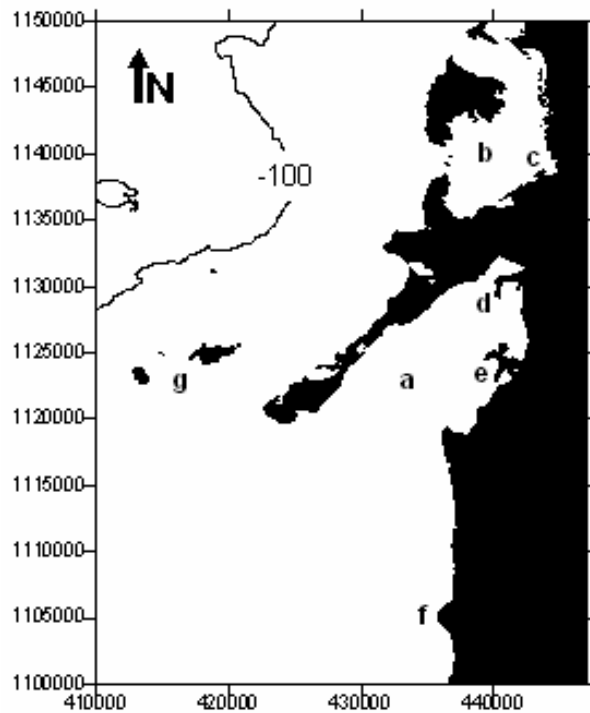


Figura 7. a) Bahía Barbacoas; b) bahía de Cartagena. c) Pasacaballos; d) boca Lequerica; e) boca Matunilla; f) caño Correa; g) Islas del Rosario. Sistema de coordenadas UTM, datum Bogotá, zona 18N.

La humedad relativa, variable que influye en el intercambio de calor entre la masa de agua y la atmósfera, oscila entre 67% y 95%. La temperatura del aire, que también influye en el intercambio de calor, presenta un ciclo anual unimodal con valores máximos del orden de 29°C en los meses de junio, julio y agosto, y valores mínimos del orden de 25°C en los meses de noviembre, diciembre y enero. Los caudales transportados por el Canal del Dique presentan un régimen bimodal con valores altos en los meses de abril y mayo, valores máximos en octubre y noviembre, caudales bajos en junio y julio, y valores mínimos en enero y febrero, con una variabilidad interanual influenciada por el ENSO, (Poveda, 1994).

Para la simulación, la zona de estudio se representó mediante una malla rectangular definida por la porción del Mar Caribe presentada en la Figura 8. Notese que la malla fue rotada 45 grados en el sentido horario para que la malla rectangular del modelo represente mejor la línea de costa a lo largo de la Isla Barú. El dominio de cálculo se dividió en celdas de 500 m por 500 m en la horizontal y un tamaño variable en la vertical con celdas más delgadas cerca de a la superficie y al nivel de la pycnoclina, y celdas más gruesas hacia el fondo.

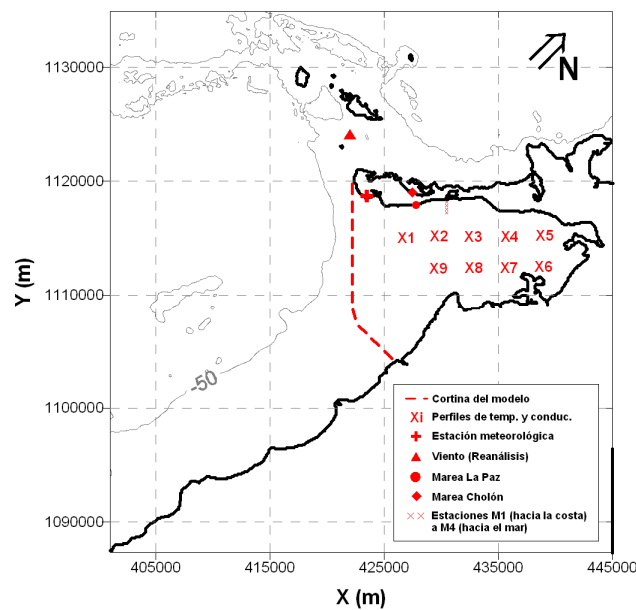


Figura 8. Dominio de cálculo con ubicación de los equipos de medición y distribución espacial de los perfiles levantados.

Campaña de Campo

Para tener una idea de los procesos físicos que gobiernan la hidrodinámica y de la distribución de masas de agua fresca y salada en el estuario, y para recolectar información para validar el modelo numérico, se realizó una campaña de campo entre el 13 y el 23 de octubre de 2008, en donde se tomaron perfiles de temperatura, salinidad y turbidez en varios puntos de la zona, en especial al interior de Bahía Barbacoas, (Figura 8). Simultáneamente, se midió el nivel del agua en dos estaciones, una en la parte externa de la Isla Barú para utilizar el nivel como condición de frontera en el modelo, y otra en la parte interna de la Isla, dentro de bahía Barbacoas, para tener datos de nivel con los cuales realizar parte de la validación del modelo. La magnitud y dirección del viento, temperatura del aire y la humedad relativa se midieron con una estación climatológica portátil instalada en el extremo de la Isla Barú. La radiación de onda corta y de onda larga se estimaron en función de la latitud, longitud, altitud y cobertura de nubes en la zona de estudio, con las formulaciones de Martin y McCutcheon, (1999). Los caudales afluentes por los caños se tomaron del modelo hidráulico del Canal.

Las mediciones de campo permitieron observar que el agua fresca proveniente de las bocas de los caños, que transporta los sedimentos finos en suspensión, forma una delgada capa superficial de solo 1.5 m de espesor. Debajo de esta capa, se encuentra otra capa de unos 1.5 m en donde se presenta un fuerte gradiente vertical de densidad y turbidez, por debajo de la cual se encuentra el agua marina (Figura 9).

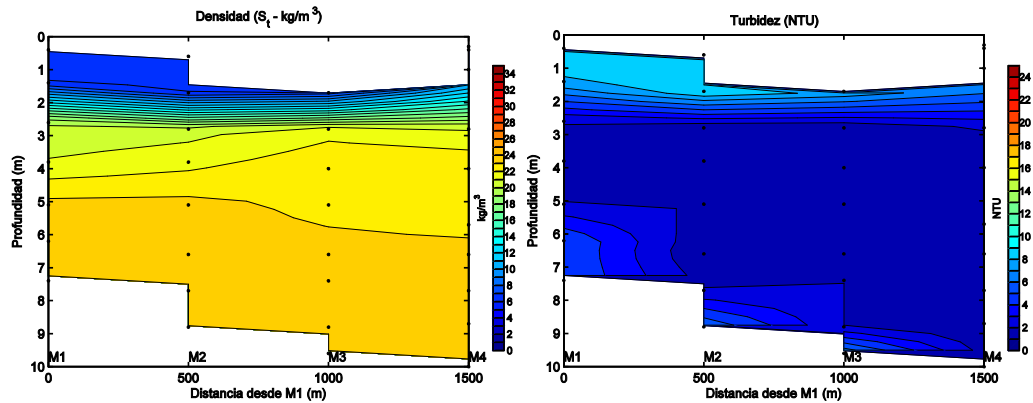


Figura 9. (a) Densidad del agua y (b) turbidez a lo largo de un corte vertical construido a partir de perfiles medidos en un transecto desde Isla Barú hacia el interior de Bahía Barbacoas.

Validación del modelo

Usando los datos recolectados durante la campaña de campo, se verificó la eficiencia del modelo para reproducir los procesos hidrodinámicos en la zona de interés. Luego de realizar el proceso estándar de calibración y validación, se obtienen los resultados mostrados, solo para algunos perfiles, en la Figura 10, en donde puede apreciarse que el modelo reproduce adecuadamente los datos tomados en campo.

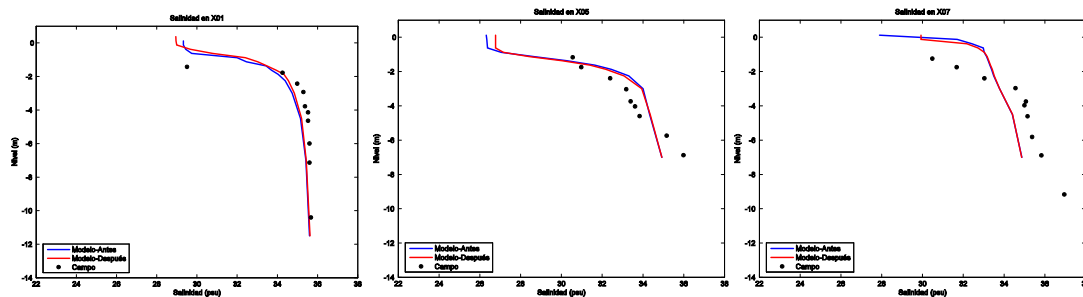


Figura 10. Perfiles de salinidad en el día Octubre 22 simulados y medidos.

Simulación para épocas climáticas críticas

Con el modelo validado, se procedió a seleccionar escenarios climáticos con mayor posibilidad de generar alto transporte de sedimentos hacia Islas del Rosario, bajo la premisa de que ocurrirían para eventos con mayor intensidad de viento o mayor aporte por los caños. Se realizó un análisis de probabilidad, y se simularon varias épocas climáticas con cada una de las modificaciones de caudal generadas por las alternativas de intervención en el Canal. Se simuló la propagación de un trazador inerte con flotabilidad neutra, que fue inyectado con los afluentes en las simulaciones; aunque el procedimiento no permite estimar directamente la concentración de sedimentos en el agua, si se puede visualizar el patrón horizontal de transporte hacia las islas, y la posibilidad de que los sedimentos finos lleguen hasta ellas.

La Figura 11 muestra los resultados de las seis alternativas de intervención en una de las épocas climáticas analizadas más críticas en términos de transporte hacia las Islas del Rosario. Para eliminar el carácter oscilatorio del transporte impuesto por la marea, los resultados se presentan como el promedio de los 10 últimos días de simulación. Puede apreciarse como las alternativas 2, 5 y 6 hacen que la mancha de concentración del 1% se aproxime más a las Islas del Rosario que la situación actual (alternativa 1). Por el contrario, las alternativas 3 y 4 hacen que dicha mancha se aproxime menos a las islas.

Para estudiar un poco más en detalle el riesgo de transporte de sedimentos finos hacia las Islas del Rosario, se almacenó el valor simulado de la concentración de trazador en un punto ubicado en la superficie del mar y justo antes de las islas. La Figura 12 permite observar que el trazador (representando los sedimentos finos) alcanza a las Islas del Rosario en forma intermitente y que su concentración alcanza valores mayores, en orden descendente, para las alternativas 5, 6 y 2. Las alternativas 4 y 3 generan concentraciones menores que la 1.

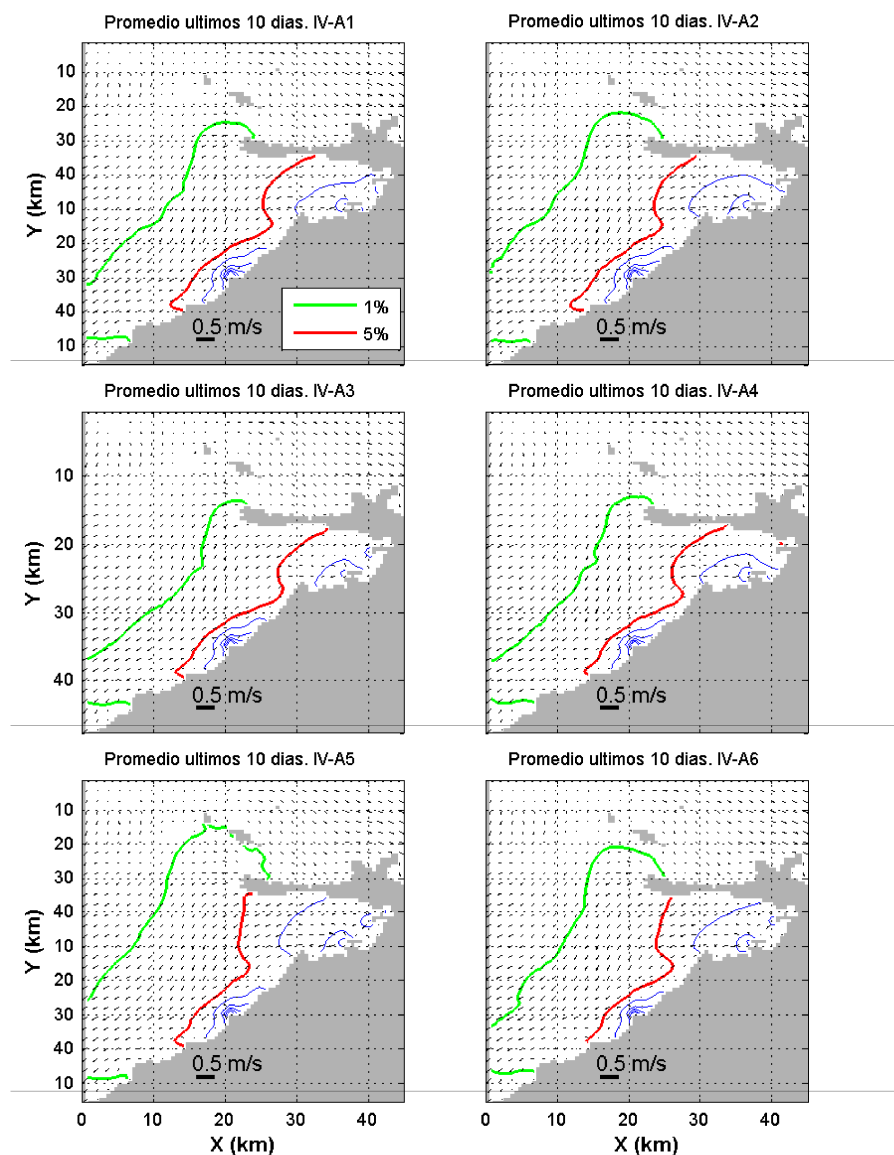


Figura 10. Campo superficial de concentración de trazador, y velocidad para las seis alternativas durante una época climática crítica. Se resaltan las concentraciones del 1% y del 5% del valor inyectado en los caños.

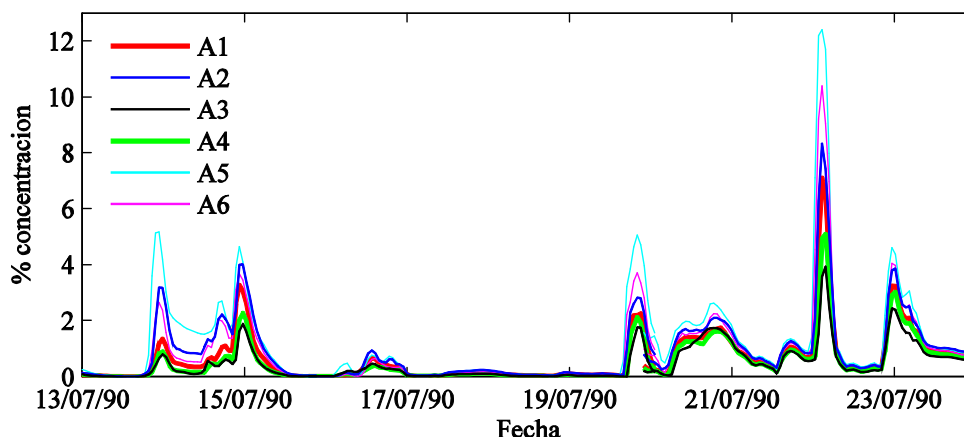


Figura 11. Concentración de trazador en un punto cerca de las Islas del Rosario. Se compara el efecto generado por las seis alternativas para una época climática crítica.

Régimen hidráulico del sistema deltaico

Dado que la zona del Canal del Dique es de tipo deltaico, es necesario advertir que los desbordes de agua son favorables para la construcción del delta, como requerimiento para la continua depositación de sedimentos que incrementa su nivel general; de otro lado, los desbordes garantizan que el agua llegue a las ciénagas, y que esas aguas tengan una presedimentación en las zonas pantanosas de la periferia de las mismas, lo cual no ocurre cuando el agua es intercambiada únicamente por los canales.

En el caso de la presente solución, los desbordes hacia la planicie inundable representan un 75% más del volumen que actualmente entra, con el consiguiente mejoramiento de las condiciones ambientales de las ciénagas; sin embargo esta condición debe ser examinada con mayor detalle para controlar inundaciones no deseadas y favorecer el desborde en zonas controladas donde no causen daños a zonas con potencial agrícola.

Navegabilidad

El presente proyecto implica ciertamente un cambio en las condiciones de navegabilidad en el canal, como también sucede con todas las demás alternativas de control sedimentológico. En el caso de los angostamientos, las condiciones son tales que el tránsito de embarcaciones mayores se debe reducir a una sola vía; solo un convoy de diseño puede atravesar la zona contraída en una dirección, pero las demoras que esto genera no superan las que habría que introducir de construirse el sistema de esclusas inicialmente previsto en Calamar.

Para juzgar las condiciones de navegabilidad en los sectores contraídos, se ha utilizado el gráfico de Fuerza tractiva Específica de Langbein, como se muestra en la figura 12. Se puede observar que aunque habrá un aumento en la potencia requerida de las embarcaciones para remontar el flujo a través de las contracciones, las condiciones no superan los límites normales para embarcaciones comerciales, ($T_s < 0.002$). Por otro lado, estas condiciones solo ocurren a lo largo de la décima parte del alineamiento, en tanto que en el restante 90% las condiciones son de menos potencia requerida, que la potencia actual de las embarcaciones.

$$T_s = \frac{550 \cdot HP}{2240 \cdot V_{d(pie/seg)} \cdot Desplazamiento_{(tons)}}$$

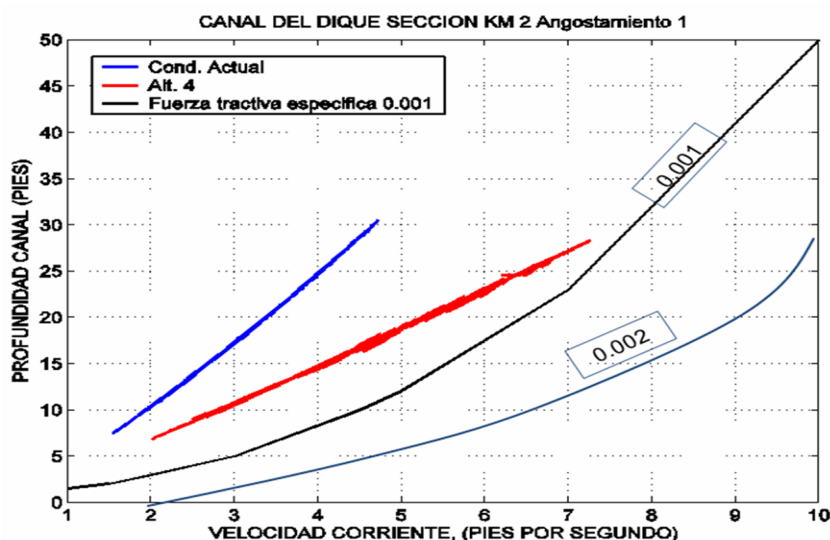


Figura 12. Diagrama de Navegabilidad de Langbein

Cuña Salina

La penetración del agua del mar en la zona es un determinante de gran importancia en las estrategias de control del agua y sedimentos en el Canal. El problema tiene por lo menos tres facetas: el avance de la cuña salina a lo largo de las corrientes, el problema de las aguas subterráneas, y el de las aguas superficiales de la zona baja de humedales y manglares. Es pertinente recordar que el nivel del mar aumenta continuamente empujando la frontera marina hacia el interior.

La alternativa considerada aquí ha demostrado que puede contener a corto y mediano plazo el avance de la cuña salina a lo largo de los cauces, merced a los aumentos de caudal que ocurren en el caño Correa y el Caño Matunilla. Es claro que el Caño Lequerica y todo el sector del canal del dique aguas abajo de la compuerta de Paricuica se salinizarán completamente si la esclusa se mantiene siempre cerrada; la situación en estos sectores se puede mejorar manteniendo la esclusa abierta durante los meses de caudal medio bajo, durante los cuales el ingreso de sedimentos a la bahía sería relativamente bajo.

Productividad pesquera

La productividad pesquera en la zona del Canal del Dique depende de los fenómenos de subienda y bajanza de peces, que ocurren a lo largo del Canal y el río Magdalena, y son fundamentales en el mantenimiento de las condiciones ambientales de la zona y de la calidad de vida de los habitantes, quienes derivan parte muy importante de su sustento de esta fuente de recursos, (LEH-UNC., 2007). Estos fenómenos son aún muy poco conocidos, pero se sabe que tienen que ver con los ciclos de ascenso y descenso de los niveles del río, de la interacción de flujos entre éste, sus caños y subcanales y las ciénagas, pantanos y humedales de la periferia del río.

Dado que la presente alternativa de control de caudal mantiene el régimen hidrológico natural, sin intervención directa de los caudales, y sin afectación del ciclo de desbordes sobre las zonas cenagosas, se considera que no habrá efectos negativos sobre los ciclos de subienda y bajanza de peces, por lo que esta opción representa una solución de baja agresividad ambiental, tanto en la calidad ecológica del sistema, como en la productividad pesquera.

Abastecimiento de Agua para Consumo Humano y Riego

En la zona del Canal del Dique se encuentran numerosos municipios que captan agua del Canal para consumo humano, entre ellos, la ciudad de Cartagena, y cinco distritos de riego que derivan sus aguas del Canal o del sistema cenagoso. El volumen requerido de agua no se verá afectado por la alternativa seleccionada, dado que aún en épocas de estiaje el Canal deriva caudales suficientes para suplir todas las necesidades de riego y consumo humano.

Los problemas que podrían presentarse por la reducción en los niveles de agua en el sistema y la intrusión salina no ocurrirían con esta alternativa dado que las tres contracciones de sección sirven para mantener los niveles altos en todas las áreas de captación.

Cambio Morfológico en el río Magdalena

El principal efecto sobre la morfología del río Magdalena, en relación con el proyecto de control de la sedimentación en el Canal del Dique, es el hecho de que los sedimentos que no ingresen al Canal del Dique por efecto de las obras, tomarán rumbo hacia Barranquilla; con lo cual, ante la pérdida de agua hacia el Canal, se puede presentar un caso de sobrealimentación de sedimentos en el sector Calamar-Barranquilla; en el presente caso, dado que se presenta también un incremento de los caudales líquidos hacia Barranquilla, este efecto es menos importante; en todo caso se considera que el efecto morfológico de los sedimentos adicionales en el río no es muy perjudicial, puesto que normalmente los ríos aluviales presentan variaciones de la carga sólida entre el 50% por debajo de su carga media de largo plazo, y del 100% por encima de la misma, por lo cual, cambios del orden de un 3% a un 5%, como los que podrían presentarse en este caso, no resultan significativos.

Protección de la margen derecha del río

La protección de la margen derecha del Río Magdalena, frente a la entrada del canal del Dique en Calamar se considera aún una necesidad primordial para el mantenimiento de una entrada segura al Canal; sin embargo, este proyecto se ha considerado como separado del proyecto de control de la sedimentación, y no forma parte de la solución final adoptada.

Evaluación ambiental de alternativas

Utilizando la misma técnica de valoración ambiental cualitativa realizada por el LEH-UN para las alternativas anteriores, (LEH-UNC. 2007), se analizaron las 6 alternativas finales para encontrar la importancia intrínseca de los impactos ambientales identificados, en términos de su naturaleza, intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, sinergia, acumulación, causa/efecto, periodicidad y recuperabilidad.

En la Figura 13, se muestra el resultado de la evaluación ambiental cualitativa, en la cual una calificación negativa significa una condición indeseable para el ambiente, y viceversa para una calificación positiva. La alternativa 4, presenta la mejor condición ambiental.

Costo de la solución final

El costo de la alternativa final considerada se ha estimado en 125 Millones de dólares, que resulta muy similar a los costos de las alternativas anteriormente consideradas óptimas, y substancialmente inferior al de la alternativa de reducción de caudal mediante una esclusa en Calamar y otras aguas abajo en la zona de Paracuica.

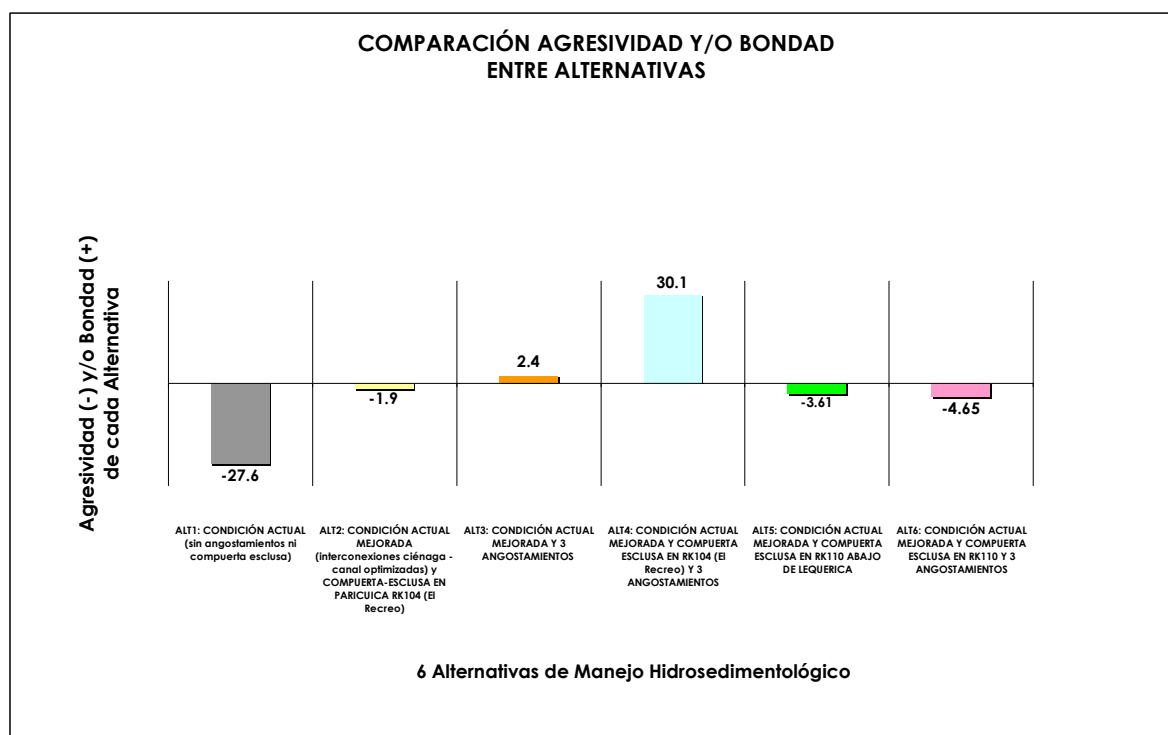


Figura 13. Comparación ambiental de alternativas

CONCLUSIONES

Los resultados de la modelación demuestran que la solución es exitosa en reducir el caudal de entrada al Canal del dique, manteniendo los niveles y permitiendo el intercambio de caudales con las ciénagas, así como los desbordes que son necesarios para el desarrollo de índices limnológicos adecuados y el crecimiento del delta del canal del Dique. A pesar del aumento de caudal hacia la bahía de Barbacoas, la afluencia de sedimentos es inferior a la cantidad que actualmente se vierte sobre ella. No existen corrientes concentradas hacia las zonas marinas, y los sedimentos, de acuerdo con la modelación del sector marino, no avanzan mar afuera hacia el archipiélago del Rosario, sino que tienen una mayor tendencia a viajar hacia el suroccidente esparciéndose sobre la plataforma submarina con lo cual se evita el deterioro de los corales de las Islas del Rosario. La alternativa presenta costos razonables y simplicidad constructiva, que son favorables a la economía nacional, por lo cual se ha recomendado para su construcción.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue realizado con el presupuesto y la supervisión de la Corporación del Río Grande de la Magdalena, CORMAGDALENA, e involucra el trabajo de numerosos ingenieros y estudiantes de la Universidad Nacional en sus sedes de Bogotá y Medellín, Colombia, así como profesionales y técnicos que acompañaron las fases de campo del proyecto. Los autores presentan sus reconocimientos al ingeniero Erasmo Rodríguez y al grupo de investigación GIREH de Bogotá, por la modelación hidrológica, y al grupo de investigación OCEANICOS de la Sede Medellín, y los profesores Andrés F. Osorio A. y Mauricio Toro B., por la modelación de la zona marina, igualmente a los estudiantes Hugo Estupiñán, Oscar A. Álvarez, Juan D. Osorio, Ángela M. Gómez y Julián Ceballos; en Cartagena al Doctor Carlos Andrade, a la Universidad de Cartagena, y a la empresa Hidro-Consultores Ltda. por los equipos facilitados para la campaña de campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

CEI Ltda. (1976). “Control de la Sedimentación en el Canal del Dique”

ESTUDIOS Y ASESORÍAS. (2000). Campañas Hidrosedimentológicas y de Calidad del Agua en el Canal del Dique. Proyecto realizado para CARDIQUE, a través del FONADE, años 1999-2000.

LEH-UNC. (2007). UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. “Estudios e investigaciones de las obras de restauración ambiental y de navegación del Canal del Dique”.

MISIÓN TÉCNICA COLOMBO-HOLANDESA - MITCH. (1973), “Río Magdalena and Canal del Dique survey Project, Bogotá, pp.329 table 4.4.5.

ORDÓÑEZ J.I. (1974). “Sediment Exclusion at River Diversions. Hydraulic Engineering Report HEL- 24”. Hydraulics and Sanitary Engineering Laboratory, UC, Berkeley.

ORDÓÑEZ, J.I. (1994). “Modelos Hidráulicos de Bocatomas y Sedimentadotes”. Estudios y Asesorías Ingenieros Consultores Ltda. Para INAT, Bogotá.

UNINORTE. (2000) Manejo de los sedimentos de la desembocadura del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena. Una primera aproximación sobre viabilidad de uso de las lengüetas de Pasacaballos Documento E063 – 022 de julio de 2000. Laboratorio de Ensayos Hidráulicos Las Flores de CORMAGDALENA, Universidad del Norte.

UNINORTE. (2000). Manejo de los sedimentos de la desembocadura del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena. Una primera aproximación sobre viabilidad de uso de las lengüetas de Pasacaballos. Informe principal. Documento E063–022.

UNINORTE. (2001). “Canal del Dique. Plan de Restauración Ambiental (primera etapa)”. Barranquilla, Colombia: 328 p.

LEH-UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, “Estudios e investigaciones de las obras de restauración ambiental y de navegación del Canal del Dique”, Bogotá, 2007.

LEH-UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, “Alternativa de Reducción del Caudal en el Canal del Dique Mediante Angostamiento de la Sección por Sectores y Construcción de la Exclusa de Paricuica”. Informe Final, Convenio 1-033-2007, Bogotá, Diciembre, 2009.

CASULLI, VINCENSO Y CHENG RALPH. Semi-implicit finite difference methods for threedimensional shallow water flow. Int. J. Numer. Methods Fluids 15, pp. 629 – 648, 1992.

HODGES B., IMBERGER J., SAGGIO A Y WINTERS K.B. Modeling basin-scale internal waves in stratified lake. Limnol. Oceanogr., 45 (7), pp. 1603-1620, 2000

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

POVEDA G., 2004. La hidroclimatología de Colombia: Una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria.