

EVALUACIÓN HIDRODINÁMICA DE LAS BAHÍAS HOOKER E ICACOSSerguei A. Lonin¹ y Luis A. Mendoza²*División de Estudios Ambientales, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia***RESUMEN**

El presente trabajo muestra los resultados de la aplicación de modelos matemáticos hidro y litodinámicos en las soluciones hidráulicas propuestas, para la recuperación ambiental de las bahías Hooker e Icacos en la Isla de San Andrés y Providencia.

ABSTRACT

In this work we show the results of the application of mathematical, hydro and litodynamical models in the proposed hydraulic solutions in the environmental recovery of Icacos and Hooker Bays in San Andres Island.

1. INTRODUCCION

Bahía Hooker y Bahía Icacos se encuentran localizadas en la costa noroeste de la isla de San Andrés, situada en el Caribe colombiano (Figura 1). En la zona noroeste de la isla se desarrolló una barrera arrecifal que individualizó la laguna costera que hoy se conoce con el nombre de bahía de San Andrés. En su parte media interior diversos procesos antiguos y residentes formaron las bahías de Hooker e Icacos.

Bahía Hooker e Icacos son un muy buen ejemplo de los diferentes tipos de contaminación localizados en un sólo sitio. En 1966 se decide la construcción del puerto de San Andrés. En la antigua ensenada de bahía Hooker se efectuó un gran relleno convirtiéndola en laguna, comunicándola al mar por un canal estrecho y poco profundo, variando totalmente su sistema hidrodinámico y haciendo difícil la renovación de sus aguas.

Ya desde 1961 al este de la bahía y a menos de 50m de la línea de costa la Electrificadora del Atlántico (posteriormente Electrosán) inicia la instalación de plantas generadoras de energía eléctrica, para la isla de San Andrés; el agua de bahía Hooker fue utilizada en un círculo abierto para enfriamiento de dichas plantas, elevando la temperatura de las aguas de la

bahía e iniciando así la contaminación térmica. El aceite lubricante de las plantas y combustibles contaminados eran vertidos a la bahía por medio del canal que llevaba las aguas de refrigeración y depositados en una piscina de decantación construida al NW de la Bahía, la cual mediante un muro separaba los hidrocarburos de las aguas por densidades. Dicho muro no tenía la suficiente altura, rebosándose en las altas mareas y contaminando con aceites la bahía y en especial los lodos de la costa Oeste, los cuales actualmente presentan un aspecto gris y maloliente.

En 1974 al Norte de bahía Hooker en cercanías al puerto, el Instituto de Crédito Territorial, construyó el "Barrio Obrero" con aproximadamente 75 casas, sin sistema de alcantarillado, efectuando la recolección de aguas negras mediante pozos sépticos, dando inicio a la contaminación por aguas negras.

Se han venido realizando algunos estudios que incluyen recomendaciones sobre las alternativas para el mejoramiento de la situación actual de la bahía, tales como planes de acción para su rehabilitación y planes de manejo. Por ejemplo, las siguientes obras, podrían mejorar el sistema desde el punto de vista de su funcionamiento ambiental; se encuentra en el Plan de Actividades y de Manejo (1997):

¹Ing. Oceanólogo Ph. D.
²Oceanógrafo Físico

- Apertura de la boca de bahía Hooker con un dragado desde 1 hasta 2 metros para el mejoramiento del intercambio de aguas;
- Dragado de un canal alrededor de la isla de manglar en bahía Hooker;
- Recolección de los lodos aceitosos hasta 0.3 metros, que invaden la parte oeste de la bahía.
- Apertura de un canal de comunicación entre bahía Hooker y bahía Icacos para mejoramiento del intercambio de las aguas.

La construcción de tales obras afecta los regímenes hidro- y litodinámico de las bahías y provoca determinados cambios ambientales a corto y largo plazo. Las variaciones de la circulación de las aguas y de la intensidad de los procesos de deposición de sedimentos en el fondo, deben ser tenidos en cuenta

en la definición de los parámetros óptimos de las obras, tales como ancho y profundidad del canal de comunicación entre las bahías, profundidad del dragado y tamaño de la boca, los cuales pueden ser optimizados con ayuda de un modelo hidrodinámico.

En este artículo se relaciona el estudio hidro- y litodinámico desarrollado en las bahías Hooker e Icacos, incluyendo el canal de comunicación entre ellas y las aguas marinas adyacentes. El artículo consta de dos partes: en la primera se define el funcionamiento actual del sistema y se determinan los procesos físicos que deben ser incluidos en el modelo. En la segunda se determinan los cambios que serán inducidos en el funcionamiento del sistema por la implementación de las obras planeadas en el área.

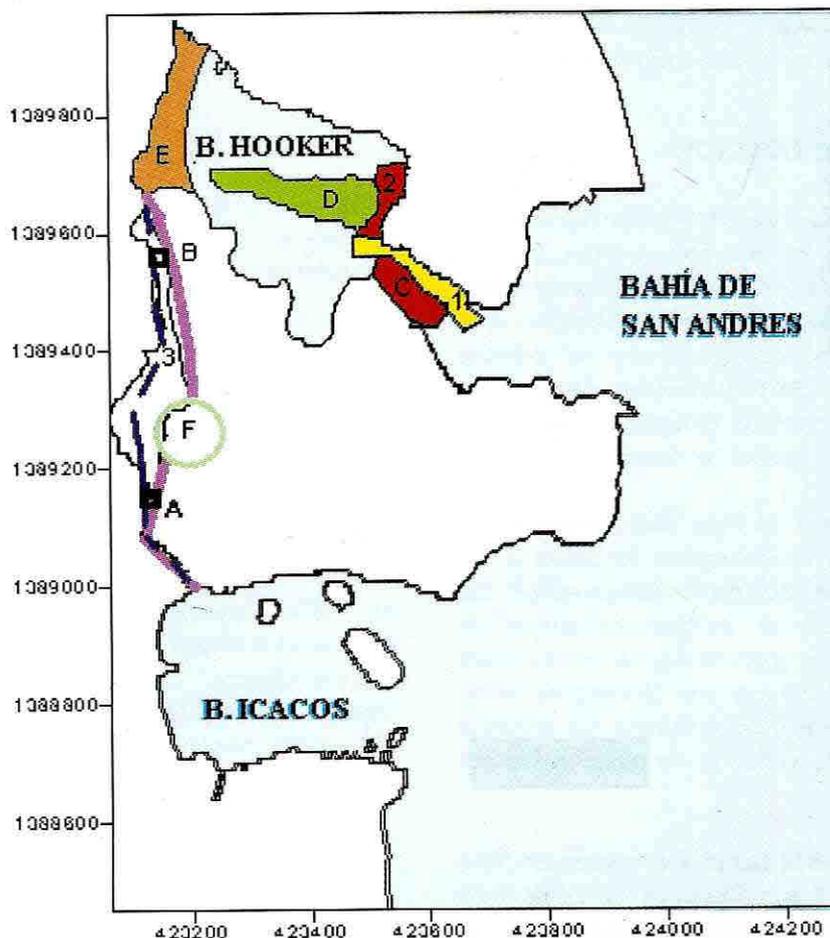


Figura 1. Zona de estudio. Convenciones de los puntos geográficos y las obras que se consideraron para las simulaciones: 1 - canal de acceso (boca de bahía Hooker); 2 - canal alrededor de la isla de manglar; 3 - canal de comunicación; A y B - puntos de control numérico del flujo calculado por el modelo; C - área de dragado; F - laguna interna. Las coordenadas X y Y se dan en metros.

2. METODOLOGIA

En el estudio se utilizó un modelo hidrodinámico desarrollado en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (Lonin y Giraldo, 1996 y 1997), acoplado con el modelo litodinámico de Lonin (Berlinskiy y Lonin, 1994). Este último ha sido modificado para obtener una versión en dos dimensiones en el plano horizontal X-Y que representa una aproximación para aguas someras, donde la batimetría ofrece variaciones con una escala característica en la horizontal mucho mayor (de unas decenas de metros), que en la vertical (decenas de centímetros - metros). En este caso todos los procesos verticales no tienen ninguna importancia, dado que su velocidad característica es mucho menor que en la horizontal. Esto conduce a que los procesos de mezcla formen perfiles uniformes de las propiedades físicas, pudiéndose así caracterizar la hidrodinámica del sector a través de los tres siguientes parámetros: velocidades planas $U(x,y,t)$, $V(x,y,t)$ y el nivel del mar $\eta(x,y,t)$. Aquí, t denota el tiempo.

Los fenómenos que afectan en mayor medida a la dinámica de la zona de interés son las mareas inducidas y el viento a través de los cambios de la batimetría y la configuración de la línea de la costa. Otros efectos generados por el viento, tales como las corrientes de deriva, no son significativos. Asimismo, la circulación termohalina y las corrientes de oleaje en la zona son bien débiles. La primera no puede desarrollarse debido a la escasa profundidad, mientras que las últimas dependen del proceso de transformación del oleaje en la zona costera y, debido también a la cercanía de la barrera de coral que no da espacio a un Fetch significativo.

Las mareas son consideradas en el modelo a través de las condiciones en la frontera abierta del área (Figura 1), que se encuentra ubicada en el sector de mayores profundidades de la bahía de San Andrés. Los efectos del viento son dados en forma de tensiones superficiales de Reynolds, homogéneas para cada punto del área, teniendo en cuenta que el espacio analizado es bastante reducido y el campo de viento no sufre grandes oscilaciones espaciales.

Así, el bloque de cálculo de las corrientes en dos dimensiones presenta la siguiente forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho H} - F_x, \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho H} - F_y, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

donde f - parámetro de Coriolis; g -gravedad; ρ - densidad del agua; (τ_{sx}, τ_{sy}) - componentes de las tensiones superficiales del viento; $F = (\vec{F}_x, \vec{F}_y)$ vector de la fricción tangencial en el fondo, es decir,

$$F_x = C_D H^{-1} U(U^2+V^2)^{1/2}; F_y = C_D H^{-1} V(U^2+V^2)^{1/2}, \\ C_D = \text{Const.}$$

El sistema (1) - (3) se resuelve en forma numérica con ayuda de las condiciones adicionales mencionadas anteriormente y de las iniciales: $U=V=0; \eta = 0$, para $t=0$. El método numérico a aplicar es el implícito de direcciones alternas.

El bloque de sedimentos se ha desarrollado de acuerdo con las expresiones de Van Rijn (1984) para transporte en estado de suspensión y en el fondo. La cantidad de partículas minerales en suspensión se determina con base en la ecuación de transporte para la concentración $C(x, y, t)$, promediada en la vertical desde la superficie hasta el fondo, en la forma

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(HUC)}{\partial x} + \frac{\partial(HVC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_{Hh} H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_{Hh} H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + E, \quad (4)$$

donde A_{Hh} es el coeficiente horizontal de difusión turbulenta; E es el flujo de las partículas a través del fondo por efecto de los procesos de erosión y sedimentación. La ecuación (4) sirve para determinar las distribuciones tanto espaciales como temporales del material en suspensión, dependiendo de la clasificación por tamaños de los granos.

El flujo E para cada tamaño de partículas en suspensión se determina aplicando el concepto de la concentración de equilibrio C_e , que se refiere a un contenido de material, que no puede superar un valor de saturación dado para las condiciones ambientales reinantes. Así,

$$E = w_g (qC_e - C), \quad (5)$$

donde W_g - velocidad de deposición de las partículas por gravedad; $q=(1-\exp(-\gamma H))/\gamma H$ es una relación teórica (aproximada) entre la concentración C_e en el fondo y el valor integral de la concentración de saturación en la columna de agua (supongamos, que $\gamma \approx 1.0$). Esta concentración debe ser calculada para cada momento del tiempo en cada punto del espacio (en cada nodo de la malla de cálculo) según la fórmula de Van Rijn (1984).

Con base en la expresión (5), se define para la tasa E de erosión/sedimentación de las partículas en el fondo, con la que es posible formular una ecuación para las variaciones temporales del nivel de sedimentos en cada punto del dominio:

$$\partial\delta/\partial t = (1-\mu)^{-1} \rho_s^{-1} [\sum E_i + \nabla Q] \quad (6)$$

donde μ - porosidad del sedimento del fondo; ρ_s - densidad de las partículas sólidas; $\sum E_i$ - suma de las tasas de erosión/sedimentación para cada tamaño de grano; ∇Q - divergencia del vector de transporte de sólidos por el fondo (sin resuspensión), calculada aplicando también una fórmula de Van Rijn (1984).

De esta forma, cuando la tasa E o la divergencia del flujo Q en la fórmula (6) presentan valores positivos, tiene lugar el fenómeno de erosión (valores δ del nivel del fondo en decadencia). En el caso contrario, se observa sedimentación.

3. DATOS UTILIZADOS

La batimetría de la zona de estudio se definió a partir de los levantamientos efectuados por el Servicio Hidrográfico del CIOH en junio de 1997 tanto en bahía Hooker como Icacos. En la Figura 1 se presenta el área de estudio, cuya batimetría fue digitalizada en una malla de 20x20 metros. La profundidad máxima registrada por el modelo en las fronteras este de la zona fue de 9 metros y la mínima de 0.1 metros. Así, para una profundidad característica $H=10$ metros, la velocidad de propagación de una onda larga resultó $C=(gH)^{1/2} \approx 10$ m/s. Para el paso de $\Delta x = \Delta y = 20$ metros el tiempo crítico (en lo referente a la estabilidad numérica de la solución) $\Delta t = 0.5 \Delta x / C = 1$ sec. Este último resultado se adoptó como paso temporal de los cálculos.

El modelo del CIOH acepta cualquier tipo de la malla, incluyéndolas con una sola celda de cálculo por normal al flujo, como en el caso de canales bastante angostos. Por ejemplo, en el caso del canal de comunicación entre

las bahías, cuando el ancho de diseño oscila entre 4 y 8 metros, se ha aplicado la capacidad del modelo de efectuar los cálculos a escala de subgrilla (dimensiones menores que los Δx ó Δy). Para el canal de comunicación se tomó la profundidad de 0.9 metros como constante, adoptando éste como un valor promedio entre los 0.8 y 1.0 metros del diseño.

De acuerdo con el informe del CIOH (1993) los vientos dominantes en el área de estudio son los alisios, que soplan de manera constante del **NE-N** con velocidades máximas en diciembre y mínimas en septiembre y octubre, con variaciones significativas de las direcciones.

Las velocidades para los vientos del este y noreste oscilan entre los 8 y 7.6 m/s, respectivamente. Los procesos litodinámicos presentan una mayor intensidad en forma sincronizada con los vientos de frecuencia predominante, por lo cual, para este estudio se ha tomado como dirección del viento 70° (este-noreste). El rango de velocidad varía entre 2.6 y 7.8 m/s, a fin de tener en cuenta los efectos del comportamiento diario natural del viento.

En el mismo Informe del CIOH (1993) se describe el área de estudio como una zona protegida que no presenta exposición a ningún oleaje, salvo la parte de su entrada, a donde tampoco llega un oleaje fuerte o significativo, pero donde se observaron por medición directa olas de amplitud entre 15 y 30 cm. En la frontera abierta se aplicó un método empírico (de Krilov) para llevar a cabo el cálculo de los parámetros del oleaje en la zona de estudio (en la frontera este) y el modelo de Lonin (sin publicar) para la transformación en la zona costera. El primer método tiene en cuenta la velocidad del viento y la profundidad local de cada punto en la frontera abierta, mientras que el modelo de Lonin es de una dimensión, basado en los postulados de Southgate (1989) sobre la teoría de ondas monocromáticas. Los resultados de esta parte del trabajo fueron usados posteriormente para calcular en cada momento del tiempo la concentración de saturación en el fondo por medio de la fórmula (5).

Las mayores mareas registradas en el área no exceden los 20 cm (CIOH, 1993). Estas son de tipo semidiurno, por lo cual, se ha hecho uso de la siguiente fórmula para definir la condición de contorno en la frontera abierta (en la parte este del área):

$$\eta = \eta_0 \cos(\omega t + \phi), \quad (7)$$

donde $\eta_0 = 0.2$ metros (amplitud); $\omega = 2\pi/12.4$ rad/horas

(frecuencia para la onda M_2); $\phi = 0$ (cualquier fase); t se da en horas.

En las fronteras norte y sur, que también son líquidas, se da la condición de Comoa para la reflexión de una onda larga.

El área de estudio presenta un sedimento con 100% de contenido de lodos con tamaño de grano menor o igual a 63 micrómetros (CIOH, 1993). De acuerdo con ISOTECH (1995), el sedimento que debe removerse en el dragado programado para el canal de acceso a Bahía Hooker Contiene 30% de arcillas y 40% de arenas calcáreas.

4. EXPERIMENTOS NUMERICOS

Con el objeto de describir en forma correcta la circulación de las aguas en las bahías de Hooker a Icacos y de pronosticar su comportamiento futuro con ayuda de un modelo, es necesario estudiar paso a paso los procesos que actualmente allí tienen lugar, provocados por distintos fenómenos. El estado pronosticado debe ser

de 19 cm. Por el contrario, durante la fase de bajamar, cuando el nivel desciende hasta -18 cm, en bahía Hooker se observa un desnivel de 0.3 cm con respecto de bahía Icacos. Así, bajo la acción de los vientos alisios, la amplitud de las oscilaciones del nivel del mar en Bahía Hooker es un poco mayor que en Bahía Icacos. Este fenómeno tiene una gran importancia para la construcción del canal de comunicación entre las bahías. Durante las fases de ascenso, las aguas se moverían desde bahía Hooker hacia bahía Icacos por el canal proyectado y durante las bajamares en sentido contrario. Este fenómeno se ve estimulado sustancialmente por la configuración batimétrica del área y la acción del viento.

Las figuras 3a - 3b presentan las corrientes en el área de estudio bajo la influencia del viento, en los sectores de mayores profundidades se desarrollan vórtices topográficos.

La Figura 4 presenta la situación actual en términos de tasa de erosión/sedimentación en el área de estudio. Los valores están dados en mm/s, fueron promediados para períodos de 24 horas (correspondientes a dos

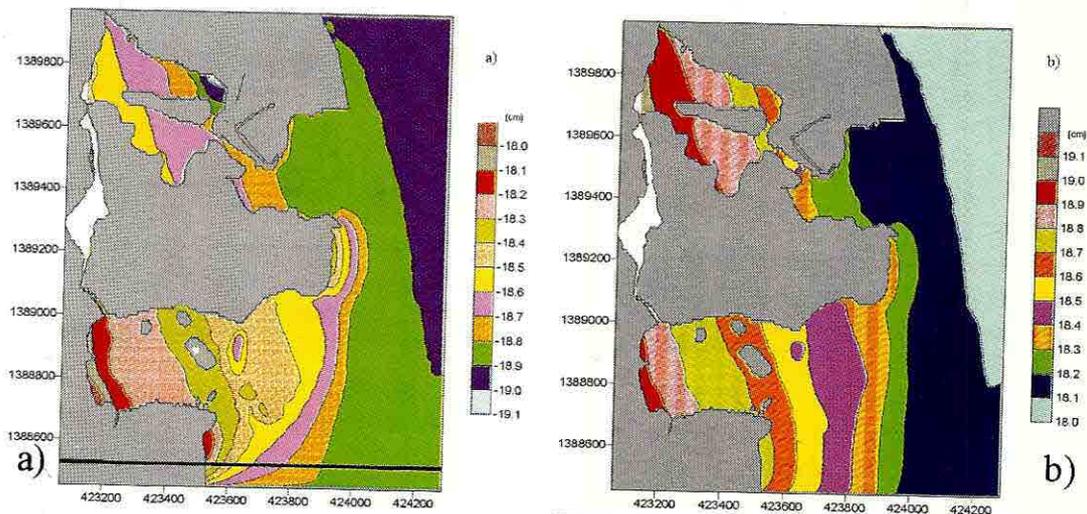


Figura 2. Variaciones espaciales del nivel del mar para las condiciones actuales. Vientos Alisios a) Marea baja; b) marea alta.

comparado con el actual a fin de emitir recomendaciones técnicas al respecto.

Las Figuras 2a y 2b presentan las variaciones espaciales del nivel del mar por efecto del viento y la marea M_2 en las dos fases correspondientes para la zona. Durante la fase de ascenso, el nivel más alto del mar se registra en bahía Hooker y la diferencia de niveles con bahía Icacos es de 0.1 cm; en general, el aumento del nivel es hasta

períodos de la marea M_2 y un período diurno de las oscilaciones del viento). Este último aspecto es muy importante para efectuar un análisis correcto de la litodinámica de la zona. Así, se registran zonas de sedimentación en algunos sectores de Bahía Icacos (originadas en sectores de irregularidades topográficas del fondo, debido a los dragados y rellenos efectuados en la zona) y en la boca de Bahía Hooker. En la bahía el proceso de sedimentación es relativamente débil,

debido al menor tamaño de grano. Sin embargo, con el tiempo la bahía presenta tendencia a sedimentarse. Esto se relaciona con la ubicación por fuera de la bahía de la "fuente" de material en suspensión y de la estimulación de este proceso por la acción del oleaje y

Antes de entrar en el análisis de los resultados obtenidos durante la fase de simulación numérica, consideramos necesario describir los cambios en la batimetría que fueron considerados. Todos los experimentos han incluido el dragado de lodos aceitosos, propuesto en el Plan de

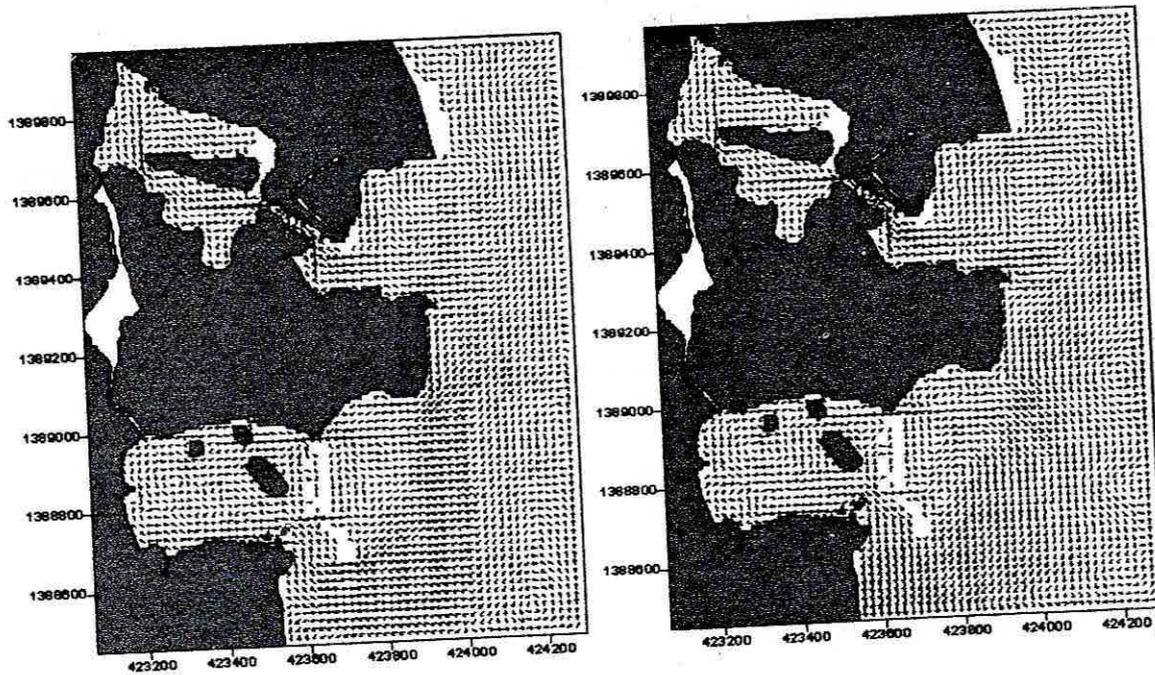


Figura 3. Campo de las corrientes para los vientos alisios. a) La marea está subiendo; b) la marea está bajando. Velocidad máxima -10 cm/s, mínima -0.1 cm/s.

el viento en la bahía de San Andrés. Es decir, la bahía Hooker por el efecto de las corrientes a través de su canal de acceso capta el material suspendido procedente de afuera, pero no tiene la posibilidad de devolverlo.

La Figura 3 presenta, asimismo, algunas zonas de erosión débil en la boca de la bahía y dentro de la misma. Estas zonas se originan por el aumento del flujo de agua y participan en el proceso de autorregulación del sistema. Este último proceso tiene varias escalas características de variabilidad y significa que las tasas de erosión o sedimentación son válidas hasta el momento en que ocurre una variación significativa de la topografía, la cual a su vez, inducirá cambios importantes en la circulación de las aguas y el transporte de sedimentos.

Acción de ISOTECH (1995), debido a que este es un procedimiento obligatorio para la recuperación de un estado normal de la bahía. Las demás obras fueron incluidas teniendo siempre como objetivo el alcance de un estado óptimo para el funcionamiento del sistema y recuperación ambiental.

Se proyectaron 3 experimentos que se resumen en la tabla No. 1 y que corresponden a lo diseñado en el Plan de actividades de Isotech (1995) y de Gómez Patiño Gómez Ltda. El canal 1 se haría en la entrada de Bahía Hooker, el canal 2 alrededor de la Isla Manglar dentro de Bahía Hooker y el canal 3 uniría Bahía Hooker con Bahía Icacos en un trayecto que pasa por la laguna interior.

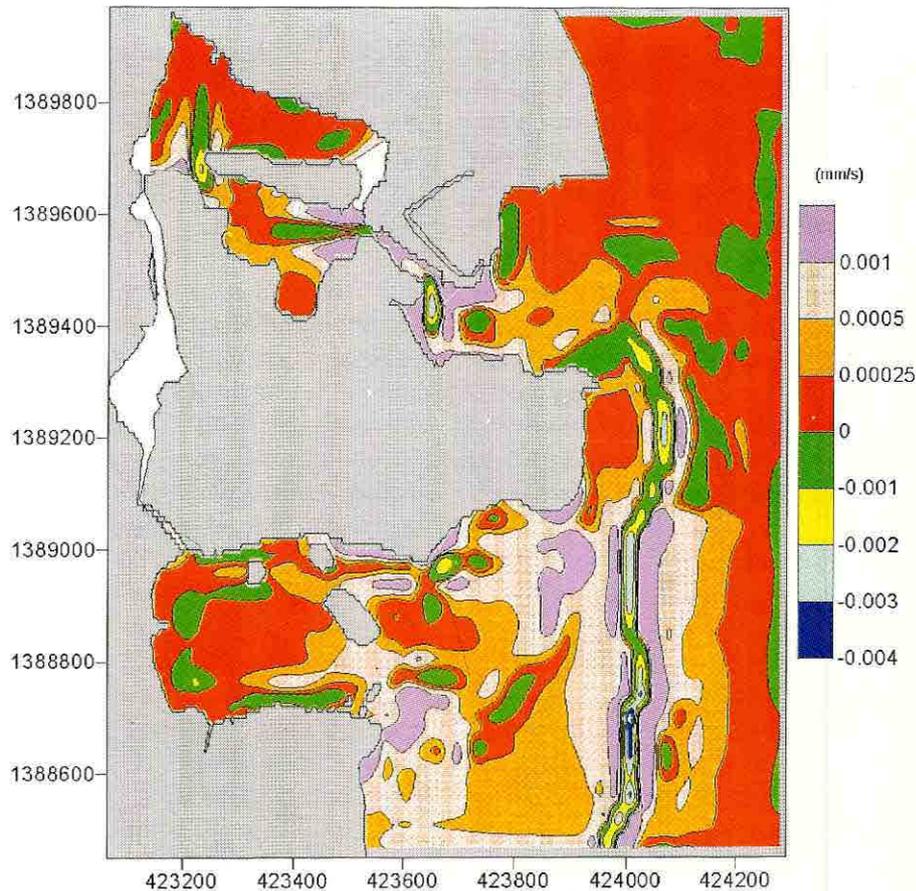


Figura 4. Tasa de erosión (valores negativos) y sedimentación

Tabla 1. Relación de los experimentos numéricos desarrollados para las diferentes alternativas de las obras (Figura 1).

Experimento	Canal 1 Boca de la bahía	Canal 2 en la Isla de manglar	Canal 3 Entre Bahía Hooker e Icosos
1	P: 1 m al norte 2 m al Sur A: 60-70 m	P: 1 m alrededor de la isla	P: 0.8 m a 1 m A: 8 m B. Hooker y laguna interior
2	Idem Experimento 1	Idem Experimento 1	P: 0.8 m a 1 m A: 16 m B. Hooker y laguna interior 8 m Bahía Icosos
3	P: 1.6 a 1.7 m	Idem Experimento 1	P: 0.8 m a 1 m A: 8 m B. Hooker 4 m Laguna interior Se trazaron al borde de la zona urbana sin afectar la laguna interior.

P= Profundidad

A= Ancho

En las Figuras 5a y 5b se presentan las corrientes resultantes en el experimento 1. Se registra un efecto positivo del dragado del canal 2, reflejado en el mejoramiento del intercambio de las aguas en la bahía. La comunicación del sistema "Bahía Hooker - Bahía Icacos" a través del canal (3) funciona de la siguiente manera: en la fase de ascenso de la marea las aguas penetran al canal por ambos extremos (tanto desde Bahía Hooker como desde Icacos) mientras que en la fase de descenso las aguas salen. El movimiento provocado por la marea se transmite hasta la laguna interna, donde los flujos convergen. Como se verá posteriormente, existe un flujo residual en el canal hacia Bahía Hooker, con velocidades menores de 2 m/s, que son las comúnmente observadas en el tramo "Bahía Hooker - laguna interna".

Las corrientes en el canal de acceso a Bahía Hooker (en la boca) disminuyen en comparación con las que se presentan actualmente, debido al aumento de la sección de la entrada. La cantidad de agua que entra (sale) a través de esta boca no aumenta con el dragado ni con la ampliación del canal, debido a que las aguas penetran sólo en dependencia de la fase de la marea. Dado que la amplitud de la marea es prácticamente constante, la masa de agua que entra no depende de la sección de la boca, excepto cuando ésta es muy angosta y no permite la libre circulación. Cabe recordar; que debido al diseño de las obras consideradas en este experimento, la

morfología de la boca no ofrece ningún tipo de restricción al paso del agua. Esto significa que el aumento de la sección del acceso a la bahía no implica un incremento en el intercambio y renovación de las aguas. Por el contrario, la disminución de las velocidades de las corrientes en la boca 1 estimulan y aumentan la sedimentación.

La Figura 6 presenta las zonas de erosión/sedimentación resultantes en el Experimento 1. Al comparar con la figura 4, correspondiente a la situación actual. Se registra el aumento de la sedimentación en la boca de Bahía Hooker y dentro de la misma. La única zona donde la sedimentación disminuye es el canal 2 (Figura 1), donde su profundización va a mejorar la renovación de las aguas.

Si el canal de comunicación entre las bahías tienen el doble del ancho (Experimento 2), en términos generales, este resultado no afecta de ninguna manera los procesos de erosión y deposición de los sedimentos. Sin embargo, el comportamiento del proceso en el canal sufre cambios positivos. La Figura 7 muestra un proceso de sedimentación prácticamente a todo lo largo del canal, que obedece al decrecimiento de las velocidades de la corriente. Por lo tanto, aumentar el ancho del canal hasta los 8 y 16 metros significará una disminución del 50% del depósito en el fondo en algunos sitios del canal.

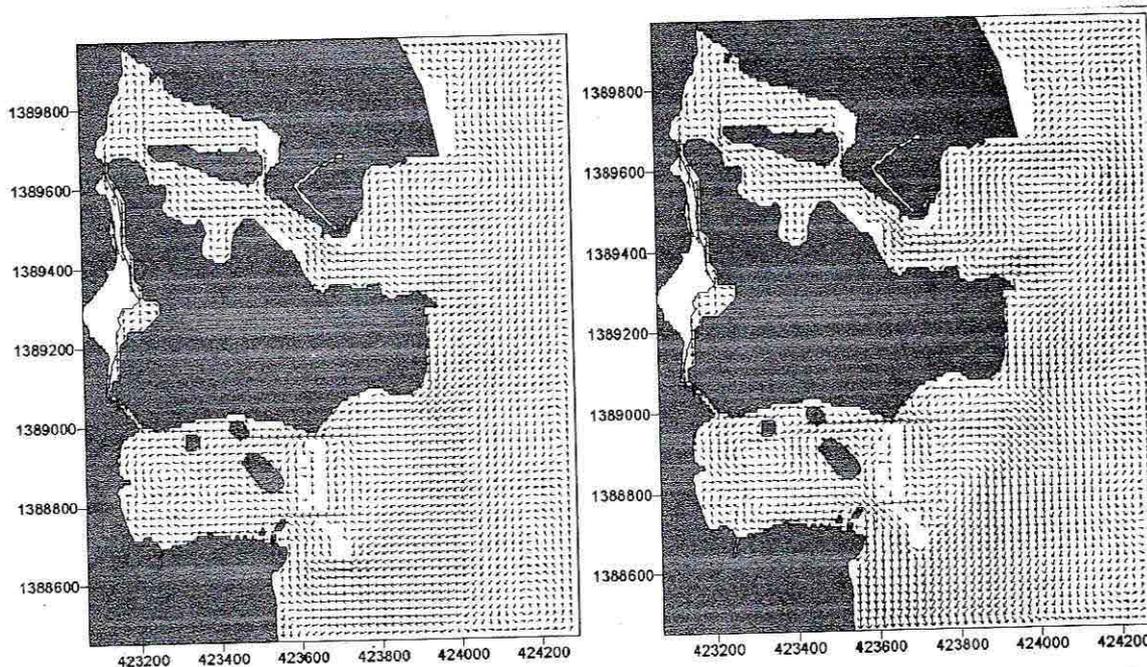


Figura 5. Corriente en el área de estudio teniendo en cuenta los cambios programados. (Experimento 1). Fase de marea en: a) ascenso; b) descenso.

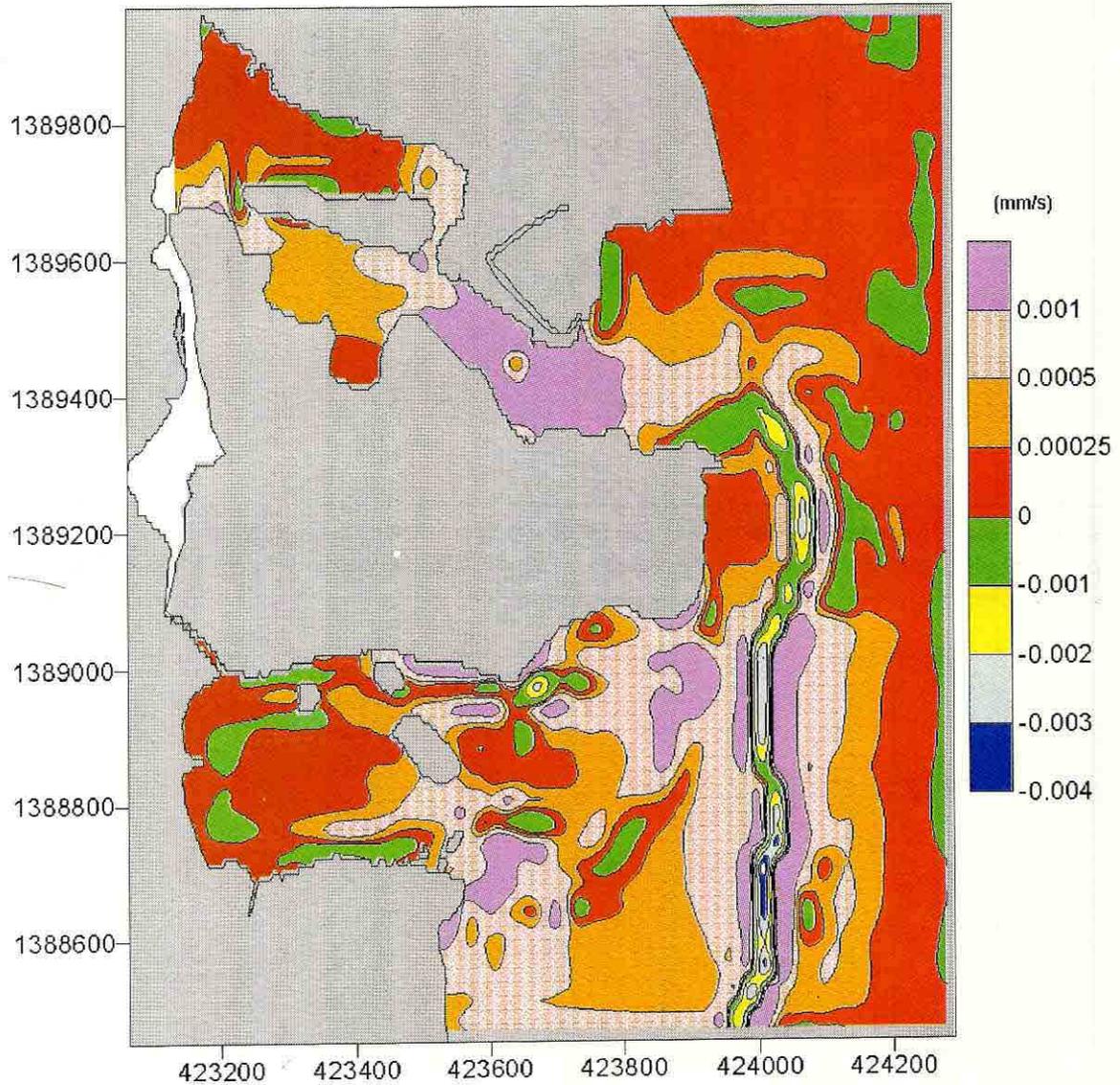


Figura 6. Tasa de erosión (valores negativos) y sedimentación (valores positivos) en el área de estudio, teniendo en cuenta los cambios programados. No se ha dibujado el canal de comunicación; el trazado del canal y sus características corresponden al diseño propuesto (Experimento 1). Comparar con la figura 4).

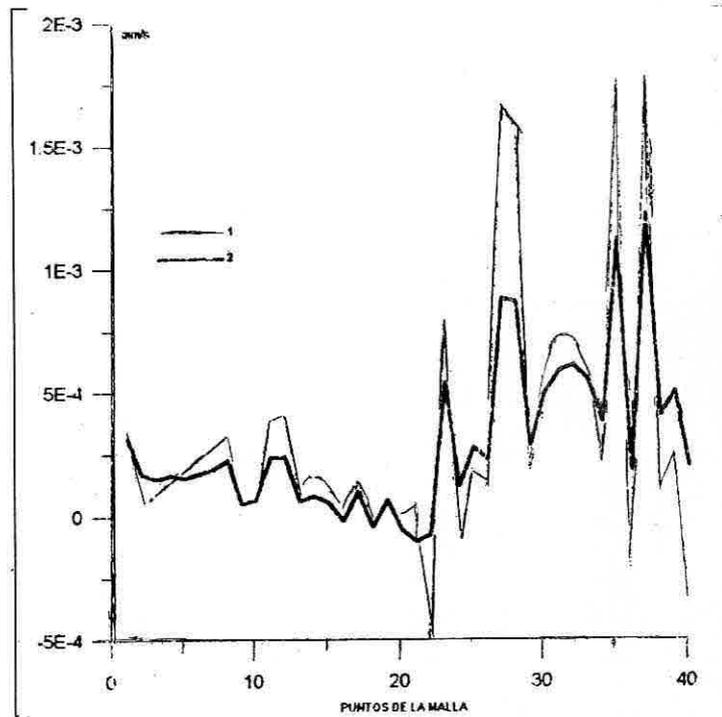


Figura 7. Tasa de erosión (-) y sedimentación (+) a lo largo del canal de comunicación en los Experimentos 1 y 2 (Tabla 1). El punto 0 corresponde al extremo del canal en Bahía Icacos, el punto 40 - en Bahía Hooker.

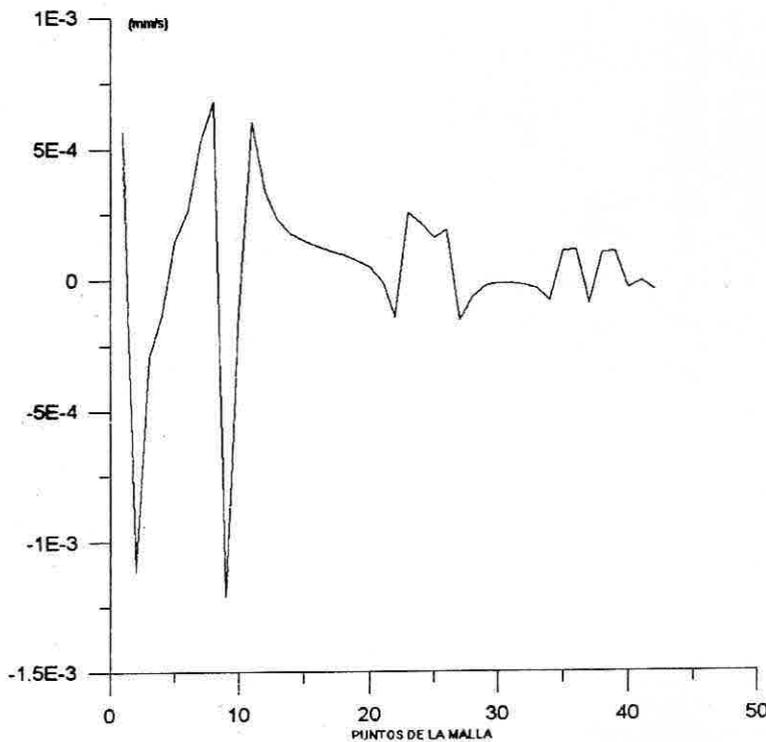


Figura 8. Comportamiento espacial (a lo largo del canal) de la tasa de erosión (valores negativos) y sedimentación (positivos) para el canal del borde urbano. El punto 0 corresponde al extremo en Bahía Icacos, el punto 50 - en Bahía Hooker (Experimento 3).

El flujo a través de la entrada de Bahía Hooker no aumentará con el dragado que se tiene planeado ejecutar. La masa de agua si crecerá algo por las siguientes razones: a) aumento del volumen de la columna de agua luego de dragar los lodos aceitosos (0.3 metros), b) apertura del canal 2 (alrededor de la isla de manglar) y c) intercambio de agua a través del canal de comunicación entre las bahías.

Este último canal no tiene una capacidad suficiente de transporte y la laguna interna se podría ver afectada por la sedimentación de material proveniente del lado marino. Es un concepto generalizado en hidráulica teórica, que para garantizar la intensidad del movimiento en un sistema de tubos (canales en este caso), es necesario contar con secciones (diámetros) variables en el diseño.

Sin embargo, debemos recordar que el resultado positivo en los experimentos 1 y 2 es válido sólo para el sector norte del canal, es decir, en su tramo hasta la laguna interna.

De otro lado, el flujo residual es el más estable en un sistema con influencia de las mareas, dado que presenta un período de promediación mucho mayor que el de la fase de la marea misma. Según la Tabla 2, para los valores característicos del flujo residual de $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$ y un área media de la sección del canal de 6 m^2 , la velocidad característica de las corrientes residuales es 0.17 cm/s . Este valor es bien pequeño y resulta en un tiempo de transporte a lo largo del canal de 100 días, que prácticamente no puede garantizar el proceso normal de renovación de las aguas en el sistema.

Adicionalmente, la Figura 8 muestra el comportamiento espacial de la tasa de erosión y sedimentación a lo largo del canal, ubicado de acuerdo con el experimento 3. En este caso, el proceso de sedimentación en el canal es mucho más lento que en los experimentos 1 y 2 (comparar con la Figura 7).

Así, los experimentos numéricos muestran un buen intercambio de las aguas en el sector norte (Bahía Hooker - laguna) del canal diseñado en el Plan de Acción y manejo de la Bahía. Sin embargo, se observa también que la laguna interna al ser comunicada con las bahías, va a sufrir un efecto negativo de sedimentación. Por otro lado, los flujos residuales en el sistema con cualquier tipo de trazado del canal son poco significativos y no son suficientes para garantizar el funcionamiento normal del sistema. Los flujos inmediatos en el canal a través

de la laguna interna, presentan siempre dos sentidos contrarios en sus extremos, mientras que a todo lo largo del canal, trazado por el borde de la zona urbana, se presentan movimientos de aguas en un mismo sentido. Por lo tanto, este último diseño del canal de comunicación entre las bahías, realizado en el experimento 3, es preferible por ofrecer la posibilidad de intensificar el flujo (por lo menos, el inmediato) de las aguas a partir del aumento de la profundidad y/o del ancho del canal.

En otras palabras, es necesario realizar un cuarto experimento, que contemple las condiciones del experimento 3 y otra sección del canal. En la Figura 9 se presenta el comportamiento temporal de los flujos de agua en los puntos A y B del canal de comunicación, ubicado en el contorno de la zona, para el caso de áreas de sección A: 3.5 y B: 7 m^2 (de acuerdo con el experimento 3) y para valores de 9 y 16.2 m^2 , respectivamente. Las primeras cifras de 3.5 y 7 m^2 corresponden a las áreas de secciones en forma de trapecio del canal propuesto en el Plan de Acción y Manejo, mientras que los últimos representan las secciones de un nuevo canal.

En la Figura se observa un aumento del flujo en el canal, proporcional a los cambios efectuados en las áreas de las secciones (comparar con la Tabla 2).

El canal que se ha propuesto para esta zona tiene una amplitud variable, lo cual no se contempló en el caso del canal de comunicación con la laguna.

Estas consideraciones llevaron a diseñar una nueva alternativa, con las siguientes características:

1. Dragado de la boca de la bahía hasta alcanzar su profundidad natural de 1.6-1.7 metros, sin aumentar su amplitud;
2. Apertura del canal 2;
3. Trazado del canal de comunicación siguiendo el borde de la zona urbana sin cruzar la laguna y con secciones variables.

En este caso, el flujo en el canal de comunicación se dirige hacia Bahía Hooker durante la marea alta, mientras que en bajamar, es hacia Bahía Icacos.

En la Tabla 2 se comparan los flujos residuales e inmediatos en el canal para los tres experimentos numéricos.

Tabla 2. Flujo residual Q_{RES} (m^3/s), desviación estándar de las fluctuaciones del flujo inmediato ($\sigma, m^3/s$) y sus valores extremos (m^3/s) en los experimentos, en los puntos ubicados en la Figura 1.

Variante	Q_{RES}		σ		min.		Máx	
	A	B	A	B	A	B	A	B
1	0.006	0.008	0.016	0.14	-0.02	-0.2	0.03	0.2
2	0.014	0.019	0.026	0.18	-0.03	-0.26	0.07	0.29
3	0.008	0.011	0.043	0.037	-0.06	-0.04	0.07	0.07

En la tabla los valores negativos corresponden a flujos de dirección sur (hacia bahía Icacos). Es interesante registrar que, en los tres experimentos, el flujo residual siempre está dirigido desde bahía Icacos hacia bahía Hooker (Q_{RES} positivo). La Tabla 2 demuestra, que el mejor resultado desde el punto de vista de intercambio de aguas se obtiene durante el experimento 2 para el sector del canal "laguna - bahía Hooker". En efecto, las siguientes estimaciones demuestran en cifras la intensidad del intercambio a través de este sector: supongamos que el canal de comunicación tiene un largo característico de $L=700$ metros; de acuerdo con la Tabla 2, los valores característicos de las corrientes en el canal $U=\sigma/A$ (A es el área de la sección del canal) oscilan entre 2 y 3 cm/s para las alternativas 1 y 2 y son menores de 1 cm/s para la 3. Así, el transporte de aguas se realiza a través del canal en un intervalo de tiempo que oscila entre 6 y 10 horas en los primeros dos experimentos y entre 25 y 30 horas para el experimento

3. La primera estimación concuerda plenamente con las variaciones temporales de la marea M_2 , predominante en la zona de estudio, que tiene una duración de cada fase de 6 horas. La última estimación nos dice que, con la velocidad resultante (menor de 1cm/s) la masa de agua no alcanza a recorrer la longitud L del canal.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de los experimentos numéricos efectuados permiten formular las siguientes conclusiones:

1. El canal de acceso a bahía Hooker (boca de la bahía) con el ancho actual de 20-30 metros y profundidades de hasta 1.2 - 1.5 metros permite un paso del agua, estimulado tanto por el viento como

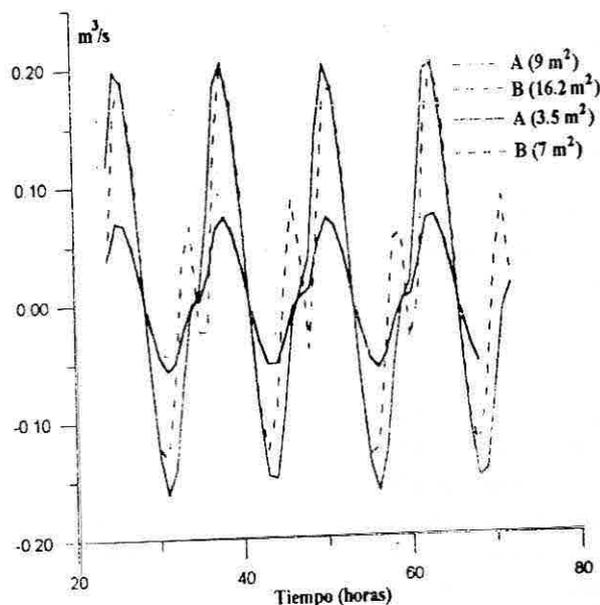


Figura 9. Comportamiento temporal de los flujos de agua en los puntos A y B del canal de comunicación (Figura 1), ubicado de acuerdo con el experimento 3 (Tabla 1) para diferentes áreas de su sección.

por la marea, sin mayores restricciones. El período de aproximadamente 6 horas de una fase de la marea semidiurna es suficiente para cubrir la amplitud de la bahía.

2. No se observa un aumento significativo del flujo de agua a través de la boca de la bahía, que sea consecuencia del dragado de la boca de la bahía, sino se tiene en cuenta un flujo adicional, que resultará del incremento del volumen de la bahía luego de ser ejecutado el dragado en su interior y por la circulación a través del canal de comunicación con bahía Icacos.

3. El aumento de las dimensiones de la entrada a la bahía va a producir una disminución de la velocidad del flujo. Como consecuencia, crecerá la tasa de sedimentación en la boca.

4. La apertura de un canal alrededor de la isla de manglar en bahía Hooker estimulará la circulación y renovación de las aguas, produciendo una disminución de la tasa de sedimentación, durante la ejecución del dragado limitado.

5. Durante la ejecución del dragado en la parte oeste, las aguas de bahía Hooker se verán invadidas por los lodos aceitosos en suspensión; los cuales, por efecto de absorción, cederán a la columna de agua gran parte de las sustancias que estos contienen, en una escala temporal correspondiente con el período del dragado.

6. El transporte de masas de aguas a través del canal de comunicación entre las bahías es poco significativo ($0.01 - 0.3 \text{ m}^3/\text{s}$) en comparación con el flujo a través de la boca de bahía Hooker ($2-3 \text{ m}^3/\text{s}$). Por esta razón, los lodos aceitosos y la contaminación secundaria que estos producirán durante y luego del dragado, tendrán una alta probabilidad de difundirse y salir a través de la boca hacia el mar y no contaminar de manera grave el sector de bahía Icacos a través del canal de comunicación.

7. Con cualquiera de las alternativas de construcción del canal de comunicación entre las bahías, el flujo residual es muy débil y no garantiza la renovación de las aguas.

8. Un aumento de la tasa de la sedimentación en bahía Hooker, producido por la ampliación eventual de su boca, será atenuado sustancialmente por la ampliación o profundización (cualquiera de las dos)

del canal de comunicación entre las bahías y mejorará el intercambio por el incremento del flujo inmediato.

9. La construcción del canal de comunicación no producirá ningún efecto negativo en el régimen litodinámico de bahía Hooker o bahía Icacos.

6. RECOMENDACIONES

1. El dragado de lodos aceitosos en el sector oeste de bahía Hooker debe realizarse durante la fase de restauración de la bahía, antes que las demás obras proyectadas.

2. Es necesario realizar un dragado limitado del canal de acceso a bahía Hooker, hasta alcanzar las profundidades naturales de la bahía (1.6 - 1.7 metros), con el objeto de suavizar la pendiente del relieve en la boca.

3. No se requiere de un fuerte aumento del tamaño de la boca. Es suficiente dragar el sector oeste del canal de acceso (la parte más angosta) del lado del manglar, hasta alcanzar una amplitud de 30 metros para dirigir el flujo en forma paralela a la isla interior.

4. Es necesario abrir un canal alrededor de la isla de manglar en Bahía Hooker (de acuerdo con el plan de ISOTECH-95) y en el sector adyacente "boca - isla de manglar".

5. El canal de comunicación debe presentar una amplitud variable y profundidades iguales en toda su extensión (similar al propuesto en el plan de ISOTECH-95).

6. Es preferible efectuar el trazado del canal de comunicación entre las bahías por el borde de la zona urbana, sin cruzar la laguna, y, en lo posible, aumentar el área de su sección. Son recomendables áreas de 9 y 16 m^2 para lograr una intensidad de intercambio de las aguas.

Esta última recomendación tiene una importancia sustancial, dado que las dimensiones propuestas para el canal son muy próximas a los valores mínimos, requeridos para garantizar el transporte de aguas en el sistema. El ancho debe aumentarse hasta alcanzar, por lo menos, el doble del valor propuesto en el Plan. El intercambio del agua no será eficiente en la medida en que se profundice el canal.

Agradecimientos: Los autores expresan su agradecimiento al Ing. Oceanólogo Luis Giraldo (q.e.p.d.) por la participación en este artículo para su publicación.

7. BIBLIOGRAFIA

Condiciones oceanográficas y ambientales de bahía Hooker Isla de San Andrés. Informe Técnico CIOH, 56 p, 1993.

Lonin, S.A. y L. Giraldo, Circulación de las Aguas y Transporte de contaminantes en la Bahía Interna de Cartagena. Boletín Científico CIOH, N.16, pp: 25-56. 1995.

Lonin S.A. y L. Giraldo, Circulación de las Aguas en la Ciénaga de la Virgen (Tesca) y Formulación de un modelo de su Calidad Boletín Científico CIOH, N. 17, pp: 65-72, 1996.

Berlinsky, N.A. and S.A. Lonin, Estimation of litodynamic process intensity in the region on the Ust-Dunaisk's port. Marine Geophysical Journal. Ukraine, No. 2, pp: 74-80. 1996.

Plan de Actividades y de Manejo Proyecto de restauración y recuperación ambiental bahía Hooker - bahía Honda. Departamento Archipiélago S. Andrés, Providencia y Santa Catalina, Febrero 150 p. 1997.

Rehabilitación de la bahía Hooker. Síntesis del Diagnóstico y Plan de Acción, Isotech, 180 p. 1995.

S. Lonin, A. Mendoza, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. A.A .982 Tel 6694465, Fax 6694390
E-mail:cloh@sirius.enap.edu.co. Cartagena, Colombia