

Resultados Preliminares del Estudio de la Dinámica del Sistema de Caños y Lagunas de Cartagena

SERGUEI LONIN, PH.D., Oceanólogo, LUIS GIRALDO, Ing. Oceanólogo

División de Estudios Ambientales, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia

RESUMEN

El presente artículo es continuación del ofrecido por los mismos autores en 1995 sobre el transporte de basuras contaminantes en la Bahía Interna de Cartagena (*Boletín Científico CIOH No. 16*). Aprovechando las capacidades del modelo MECCA (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment, Hess, 1989), se ha estudiado en forma conjunta el movimiento de las aguas de la Bahía Interna de Cartagena y su sistema de caños y lagunas alrededor de la Isla de Manga, para el caso concreto de las condiciones meteorológicas y mareográficas presentadas en agosto de 1995. Con base en los resultados del cálculo de las corrientes a lo largo del eje del sistema de caños se ha determinado el tiempo de intercambio y renovación de las aguas. Los resultados de la modelación indican un predominio de las corrientes residuales, formadas por las mareas y las variaciones del viento, en la definición del tiempo de renovación de las aguas en los caños. Asimismo, la evacuación de las aguas de los caños en el sector oriental de la Bahía Interna actúa como factor importante de aumento de la contaminación en el lugar.

ABSTRACT

This paper is the continuation of one written by the same authors in 1995 about the transport of pollutants in the Internal Bay of Cartagena (Sci. Bull. CIOH N. 16). Using capabilities of the MECCA model, the water movement of the Internal Bay of Cartagena and its system of channels and lagoons has been studied for the meteorological and tidal conditions, presented in august of 1995. Taking into account the currents calculated along the central axis of the system, the water interchange and renovation time has been defined. The results of the modelation shows a predominance of the residual currents, originated by the tides and variations of the wind field, in the intensification of the water renovation in the channels. Likewise, the evacuation of the water from the channels in the east sector of the Internal Bay is an important factor for the pollution of the place.

1. INTRODUCCION

El sistema de caños y lagunas de la ciudad de Cartagena de Indias, alrededor de la Isla de Manga, sufre de un alto deterioro ecológico debido, principalmente a dos factores: La gran contaminación por aguas servidas y otros tipos de desechos, de un lado, y el intercambio débil de aguas con la Bahía Interna, de otro. Se estima como causa primordial de la situación el primer factor citado. Sin embargo, una solución radical del problema ecológico exige tomar una serie de medidas integrales que, dado su costo económico, es posible que no sean adoptadas en un futuro próximo.

En relación con esto, se están haciendo algunos intentos por mejorar la situación con base en medidas "indirectas". En particular, se ha propuesto profundizar los caños y formar una comunicación alterna de estos con el mar, lo que garantizaría una renovación ágil de las aguas. Medidas como éstas deben

cimentarse en el estudio detallado del estado actual de los caños, desde el punto de vista hidrodinámico, hidroquímico e hidrobiológico, para luego, con base en modelos de simulación pronosticar las variaciones del régimen relacionadas con las obras de ingeniería.

El trabajo que aquí se presenta es tan solo el primer paso hacia la solución del problema. Los autores no pretenden dar conclusiones definitivas sobre el asunto, sino, tomando como ejemplo una de las épocas del año, caracterizar el comportamiento dinámico del sistema. Sin embargo, las investigaciones adelantadas ofrecen una nueva forma de afrontar problemas de este tipo utilizando métodos de modelación matemática. En las conclusiones del trabajo se dan las principales etapas que deben seguirse en el estudio del problema.

Este trabajo es continuación del presentado en Lonin y Giraldo, (1995) en el marco de las tareas de intercalibración de modelos hidrodinámicos, en desarrollo del proyecto "Modelación numérica

de la circulación costera y su aplicación al estudio de los procesos de transporte de sustancias y partículas contaminantes en el litoral Caribe colombiano”.

2. FORMULACION DEL PROBLEMA Y DESCRIPCION DE LA INFORMACION

La dinámica del sistema de caños y lagunas de Cartagena está relacionada con el movimiento de las aguas en la Bahía y es por eso que, estos dos cuerpos deben ser analizados en forma conjunta. En el trabajo de *Lonin y Giraldo*, (1995) se subrayó que sobre la dinámica de la Bahía Interna de Cartagena ejerce una gran influencia el viento, mientras que la acción de las mareas no es significativa. Sin embargo, en canales muy angostos las corrientes de marea pueden convertirse en el único factor determinante desde el punto de vista práctico, participando en la redistribución de las sustancias contaminantes. Por lo visto, el viento ejerce una influencia indirecta a través de la variación del nivel del agua a la entrada de los canales, es decir, su acción tiene un efecto no local. Los efectos locales producidos por las corrientes de deriva en los canales deben ser, por lo tanto, poco significativos.

Los caños representan una formación de poca profundidad (las profundidades medias son cercanas a un metro) y, por lo tanto, las corrientes en ellos no sufren grandes variaciones en la vertical, es decir, tienen un carácter barotrópico. Sin embargo, con el objeto de estudiar la dinámica de la Bahía Interna y el sistema de caños como un todo, hemos utilizado el modelo hidrodinámico 3-D MECCA (*Hess*, 1989). Este último tiene la capacidad de calcular al mismo tiempo, los procesos para la grilla inicial del modelo (Bahía Interna de Cartagena) y a escalas de subgrilla (sistema de caños), cuando el paso por diferencias finitas en la grilla es comparable o supera la amplitud del área de cálculo.

Para estudiar la circulación en los caños analizamos una situación hidrometeorológica real, propia de la época húmeda. En calidad de información de forzamiento, utilizamos datos sobre las oscilaciones del nivel por mareas y registros horarios del viento, tomados en la estación del CIOH, durante el período comprendido entre el 9 y el 29 de agosto de 1995. Estos datos fueron utilizados anteriormente para el cálculo de la dinámica en la Bahía Interna de Cartagena y se presentaron en el trabajo de *Lonin y Giraldo* (1995). En las Figuras 1 y 2 del trabajo citado se dan los datos sobre el campo del viento y el nivel del mar para el período estudiado.

Para esta época del año son características variaciones significativas de la dirección del viento y, por lo tanto, representativas del comportamiento del sistema desde el punto de vista del régimen climático en los supuestos de ergodicidad del proceso.

Cabe resaltar que se han utilizado datos reales en lugar de información climatológica, debido a que las variaciones temporales de los campos de viento y nivel del mar tienen períodos característicos de un día y menos. Los procesos de intercambio de masa están condicionados por estas variaciones, así como por efectos no lineales (que originan una circulación residual) en la escala espacio - temporal dada. La parte del espectro que nos interesa en estos datos ha sido filtrada. Asimismo, sabemos que al describir sistemas no lineales no se deben utilizar datos externos promediados si el período de promediación es igual o supera el intervalo de tiempo estudiado. En relación con esto, las conclusiones sobre la varianza de largo período del estado del sistema dado se pueden formular sólo con base en numerosos y detallados cálculos de la estructura de los campos dinámicos.

Teniendo en cuenta objetivos de estudios posteriores es recomendable, asimismo, estimar el tiempo de intercambio de agua (T_{ic}) y de renovación del agua (T_m) del sistema de caños. La primera magnitud representa la relación del volumen de agua del sistema con respecto a su caudal característico. El tiempo de renovación del agua (T_m) es el tiempo de desaparición total de una sustancia contaminante cualquiera, distribuida inicialmente en forma homogénea. Es obvio que $T_m \geq T_{ic}$ y en determinados casos $T_m \gg T_{ic}$. Así por ejemplo, estudiando la parte noroccidental del mar Negro (*Lonin*, 1990), el autor encontró que $T_{ic} \approx 20$ días, mientras que $T_m \approx 1$ año. Sin embargo, tales diferencias entre estos dos parámetros son características para sistemas amplios, parcialmente limitados por una frontera líquida muy larga. En el caso del sistema de canales de Cartagena es obvio que $T_m \rightarrow T_{ic}$ debido a que es posible esperar un transporte de agua en una sola dirección tanto en amplitud como profundidad del canal. En relación con esto, en el presente trabajo nos limitaremos al cálculo del tiempo de intercambio de agua.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

Con base en el modelo matemático MECCA y en la utilización de los datos descritos anteriormente, se efectuaron cálculos de la dinámica en el sistema de caños y lagunas y en la Bahía Interna de Cartagena. Los datos sobre el nivel del mar fueron dados para la frontera líquida abierta del área estudiada (entre Manzanillo y Castillogrande) dado que, es claro que las variaciones espaciales del nivel en esta área no son significativas. El viento fue considerado homogéneo en todo el área.

A partir de los resultados del cálculo de las corrientes en los caños para los puntos 1 y 44 (Figura 3b), fueron determinados los caudales totales Q , cuya variación temporal se presenta en la Figura 1. Los valores de los caudales no son muy altos y, por lo general, no superan $\pm 8 - 9 \text{ m}^3/\text{s}$. Llama la atención la oscilación de

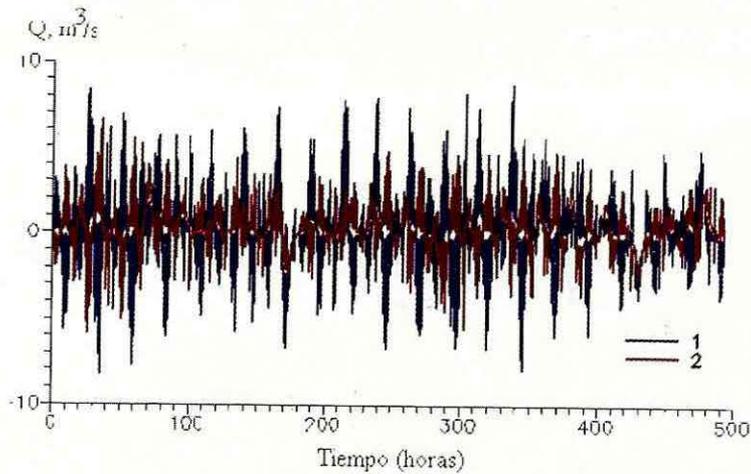


Fig. 1. Comportamiento del caudal de agua a lo largo del eje del sistema de caños en el punto 1 (curva 1) y 44 (curva 2) durante el período estudiado. La posición de los puntos se presenta en la Figura 3b. Los valores positivos corresponden al movimiento de las aguas desde la laguna de San Lázaro hacia la laguna Las Quintas.

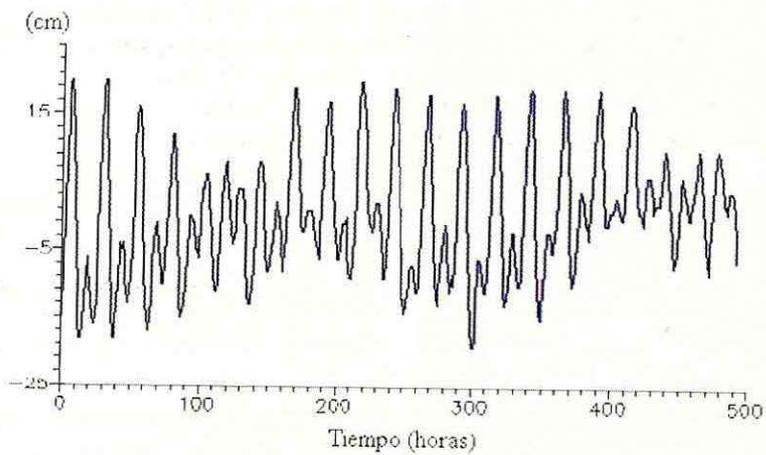


Fig. 2. Comportamiento de la elevación del nivel del mar durante el período analizado en el punto que se señala en la Figura 3b.

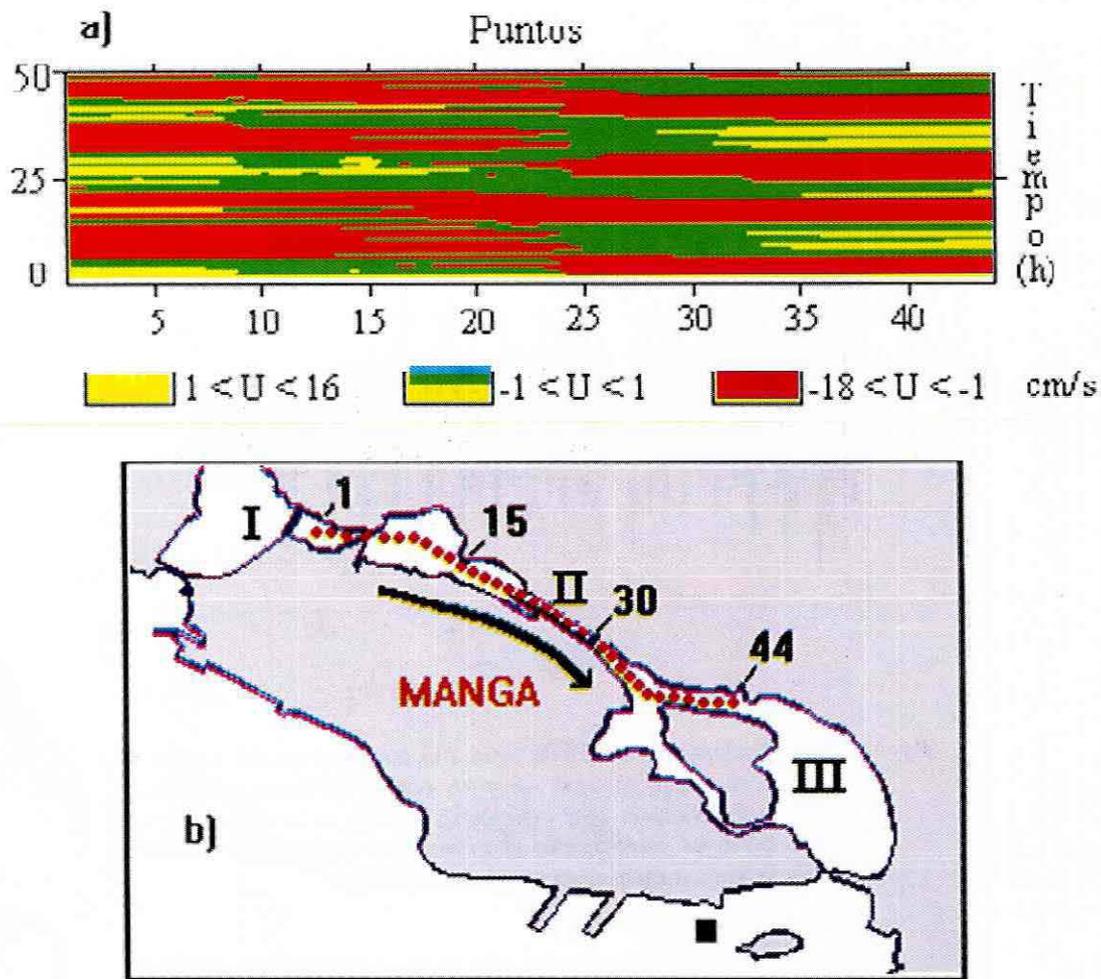


Fig. 3. Fragmento de la distribución espacio - temporal de las velocidades de las corrientes U (a) para las primeras 50 horas de cálculo entre los puntos 1 - 44 (b). **Convenciones:** I-Laguna de San Lázaro, II-Avenida El Lago, III-Laguna Las Quintas, ■-posición del punto de cálculo del nivel en la Figura 2, →-dirección de la circulación residual en el sistema durante el período analizado.

signo de los flujos del agua, siendo lo más interesante el que las direcciones de los caudales en los puntos 1 y 44 tienen signo contrario. En otras palabras, en fase de marea alta se observa la entrada de agua a través de ambos extremos del sistema, mientras que en marea baja el agua sale a través de los mismos. Estas oscilaciones de signo de los caudales de agua en los caños se encuentran en correspondencia con el régimen de mareas, presentado en la Figura 2. La variación del nivel generada por el viento, también produce una influencia determinada.

En caso de existir flujos de direcciones encontradas en el sistema de caños, parece entonces interesante estudiar la intensidad de la penetración de las aguas por cada ciclo de marea. En la Figura 3a se presenta un fragmento de la estructura espacio - temporal de las corrientes a lo largo del eje del canal para las primeras 50 horas de

cálculo. Este gráfico se complementa con la Figura 3b. En la primera Figura se puede observar que la corriente en los caños tiene un carácter bastante regular y la zona de "confluencia" de los flujos encontrados se ubica en la parte más estrecha del sistema, justo en la región de la Avenida El Lago, en la denominada ciénaga Las Quintas (punto II en la Figura 3b). Así, las corrientes a lo largo del eje del caño son débiles y no superan 1 - 2 cm/s.

Con el objeto de analizar las oscilaciones obtenidas fueron calculados los espectros temporales de las variaciones del nivel del mar y del módulo de velocidad de las corrientes en el caño. Los espectros se pueden observar en la Figura 4. Se puede concluir que los máximos energéticos de las oscilaciones del nivel y las corrientes se ubican en las frecuencias de mareas semidiurnas y diurnas. Sin embargo, en el espectro de las oscilaciones del módulo

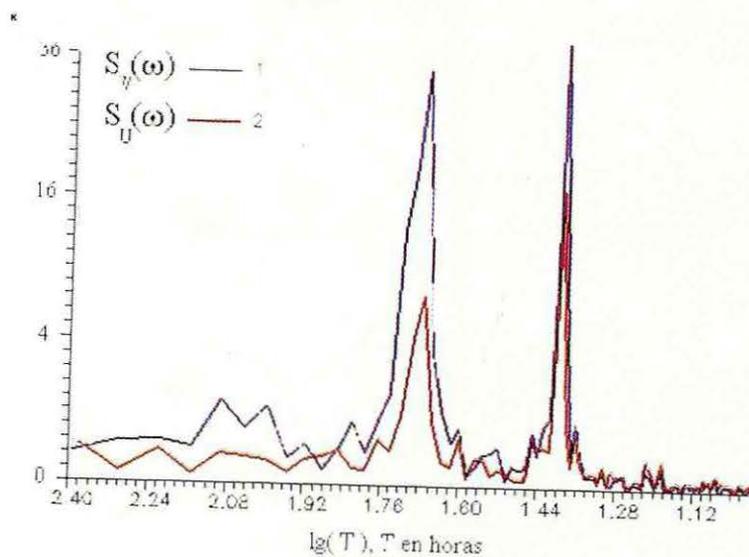


Fig. 4. Espectros temporales de las oscilaciones del nivel del mar [$S_{\eta} \times 10^4, m^2$] (1) y velocidad de la corriente en el sistema de caños [$S_U \times 10^4, m^2/s^2$] (2).

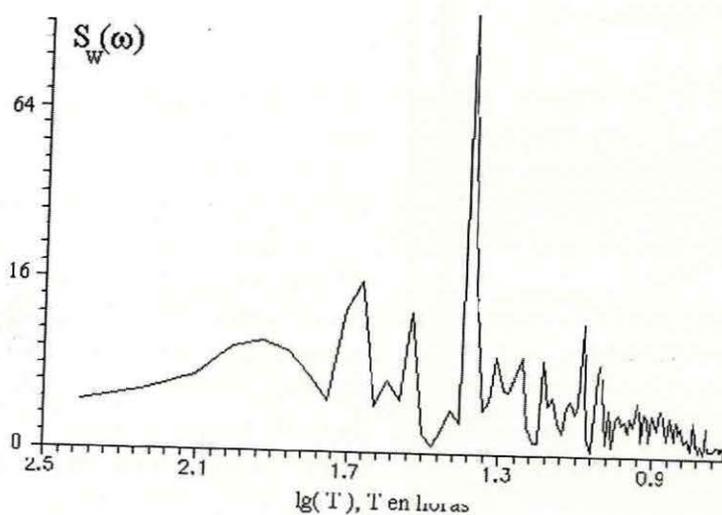


Fig. 5. Espectro temporal del modulo de velocidad del viento [$S_W \times 10^2, m^2/s^2$].

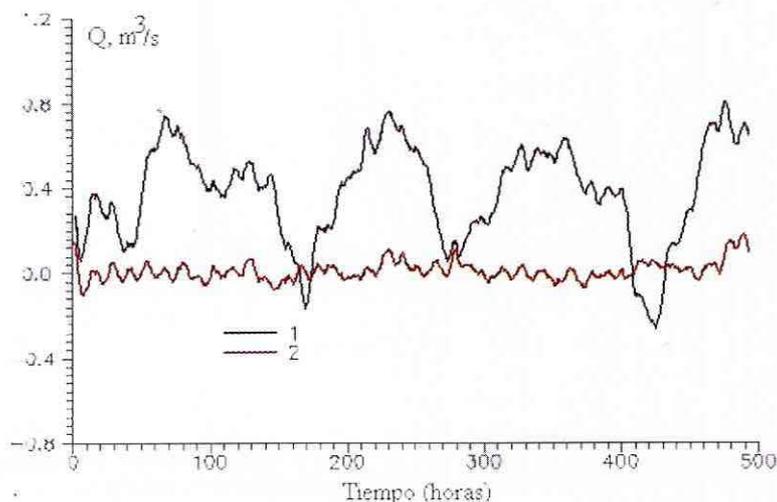


Fig. 6. Comportamiento del flujo residual en el punto 44 (v. Figura 3b) para la situación meteorológica real (1) y para estado de calma (2).

de velocidad del viento (Figura 5) se observan también oscilaciones diurnas y, por lo tanto, el viento ejerce, también influencia sobre la dinámica del sistema de caños, pero, en nuestra opinión, mucho menor que las mareas. Como veremos más adelante, esta conclusión no se ajusta al caso de la circulación residual (promediada).

Caracterizando en forma total el período estudiado desde el punto de vista de la intensidad de los procesos dinámicos en el sistema de caños, podemos constatar que la débil circulación que allí se presenta no favorece una renovación rápida de las aguas. El carácter reversible de las corrientes de marea no ayuda a la evacuación de sustancias contaminantes y, sobre su transporte, se pueden hacer algunas estimaciones sólo con base en la circulación residual. Para el cálculo de las corrientes residuales se efectuó un corrido (*running mean*) de la serie temporal de los caudales que se presenta en la Figura 1 con una ventana de 24 horas. De esta forma, se filtraron las oscilaciones diurnas y semidiurnas de las corrientes. Se estableció que el máximo caudal de la circulación residual no supera $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Para todo el período de cálculo el transporte promedio fue de $Q_m = 0.31 \text{ m}^3/\text{s}$ y tiene

signo positivo, lo que, en este caso, corresponde al transporte de aguas y de sustancia contaminante en la dirección desde el punto I hacia el punto III (Figura 3b).

De esta forma, existe una débil circulación en una sola dirección que garantiza la renovación de las aguas en el caño. La estimación del tiempo de intercambio del agua (renovación del agua)¹ se determina como $T = V/Q_m$, donde V - es el volumen del agua en los caños. Este último parámetro se utiliza para la grilla del modelo y es igual a 0.42 Km^3 y, por lo tanto, el tiempo de renovación de las aguas alcanza, aproximadamente, 16 días. Debe tenerse en cuenta, que este valor es sólo una estimación del orden del tiempo de intercambio del agua y que las aguas que rodean al sistema desde la Bahía se encuentran también contaminadas. La circulación residual, que determina el tiempo de renovación de las aguas de los caños, se puede formar debido a dos factores, como son los efectos no lineales de las mareas y las oscilaciones de período largo (período superior a 24 horas) de la dirección y

¹ En este caso no se hace diferencia entre estos parámetros teniendo en cuenta lo explicado en el punto 1.

velocidad del viento. Para la definición de la naturaleza del flujo residual se realizaron cálculos de la circulación inducida sólo por las mareas (para todo el período estudiado se propuso la velocidad del viento igual a cero). Luego, las series de tiempo obtenidas sobre caudales de agua, fueron promediadas por corrido para la filtración de las oscilaciones diurnas y semi-diurnas. En la Figura 6 se presentan los comportamientos temporales de los caudales residuales del agua para las condiciones meteorológicas reales y para estados de calma. Los resultados permiten ver que, es precisamente la acción del viento la que determina la dirección e intensidad de la circulación residual en el sistema de caños. Efectivamente, en la Figura 6 (curva 1) se observa que bajo el efecto del viento los caudales positivos (direcciones desde el punto I al punto III en la Figura 3b) predominan sobre los negativos. En el caso de la circulación debida sólo a las mareas bajo condiciones de calma (curva 2) el valor de Q_m es cercano a cero y el tiempo correspondiente de intercambio de agua T es igual a 787 días, es decir, superior a dos años.

Señalamos que en el trabajo de *Lonin y Giraldo (1995)* cuando se modeló el desplazamiento de la basura flotante a partir de la información meteorológica empleada en este mismo trabajo, se observó que, sin depender de la ubicación de la fuente de basura en el área de la Bahía Interna de Cartagena, la parte oriental fue la más contaminada. Si la dirección del transporte residual que se presenta en la Figura 3b es la corriente predominante, por lo menos durante la época húmeda del año, significa que la contaminación en el sector oriental de la Bahía obedece además a la acción de este segundo factor, el cual no es otra cosa que el flujo de evacuación que proviene del sistema de caños hacia la Bahía en este sector.

4. CONCLUSIONES

Los resultados que se presentan en este trabajo tienen un carácter preliminar. Con base en cálculos efectuados para datos hidrometeorológicos correspondientes al mes de agosto de 1995 se obtuvo el esquema de la circulación del sistema de caños y lagunas de la Bahía de Cartagena. Las principales particularidades de este esquema son las siguientes:

1. El movimiento de las aguas en el sistema se determina, principalmente, por las corrientes reversivas de marea.
2. Las corrientes presentan un carácter unidireccional por amplitud y varían débilmente por profundidad. Las corrientes en fase de marea alta se orientan hacia el centro del sistema de caños (hacia la región más estrecha a lo largo de la Avenida El Lago) en la ciénaga de Las Quintas, en la fase de marea baja en sentido contrario.
3. La circulación residual durante el período estudiado no supera $1.1 \text{ m}^3/\text{s}$, el transporte medio integral es igual a $0.31 \text{ m}^3/\text{s}$ y se orienta hacia la parte oriental de la Bahía Interna de Cartagena.
4. Esta última circunstancia, al igual que los resultados del trabajo anterior sobre desplazamiento de basura flotante en la Bahía, hablan de la mayor probabilidad de contaminación de la parte oriental de la Bahía en comparación con los demás sectores.
5. La estimación del intercambio de agua (renovación de las aguas) del sistema de caños es igual a 16 días, aproximadamente.
6. La intensidad de la circulación residual y, por consiguiente, el tiempo de renovación del agua, se determinan no por la acción de las mareas, sino por el efecto del viento, a pesar de la influencia débil (en comparación con las mareas) del viento sobre las corrientes "instantáneas" (no promediadas) en el sistema de caños.

La utilización de las herramientas de la modelación matemática abre las puertas hacia una gran cantidad de posibilidades para la investigación integral del tema tratado en el presente artículo, así como para el diseño de recomendaciones concretas y prácticas. En calidad de tales perspectivas podemos citar las siguientes:

- Determinación cuantitativa de las cargas antropogénicas por cada elemento de contaminación en los caños y lagunas.
- Formación de un modelo de calidad de las aguas para la Bahía Interna de Cartagena con la inclusión en este del modelo del sistema de caños, utilizando, por ejemplo, el bloque hidrodinámico del modelo MECCA, aplicado en este trabajo.
- Simulación, con ayuda del modelo, de las variantes que se han propuesto en otros trabajos de recuperación del sistema de caños con el objeto de elegir la de mejor aplicación.

Agradecimientos: Este trabajo fue realizado con el apoyo y co-financiación de Colciencias dentro del Proyecto: "Modelación Numérica de la Circulación Costera y su Aplicación al Estudio de los Procesos de Transporte de Sustancias Contaminantes en el Litoral Caribe Colombiano" (Cod. 0140-09-347-95).

BIBLIOGRAFIA

- Hess, K. W., MECCA Programs Documentation, *NOAA Technical Report NESDIS 46*, Washington, D.C., 1989.
- Lonin, S. A., Simulation of Currents and Distribution of a Pollutant in the North-Western Part of the Black Sea, *VNIIGMI Publ. N. 1007*, 28 p., 1990.
- Lonin, S. y L. Giraldo, Circulación de las Aguas y Transporte de Contaminantes en la Bahía Interna de Cartagena. *Bol. Cient. CIOH, No. 16*, pp. 25-56, 1995.
- S. Lonin, Giraldo L., Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, A.A. 982, Tel +57-56-694465, Fax 694390, E-mail: cioh@sirius.enap.edu.co