

14

CIRCULACION DE LAS AGUAS Y TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN LA BAHIA INTERNA DE CARTAGENA

SERGUEI LONIN, Ph. D.*

LUIS GIRALDO, Ingeniero Oceanólogo*

** Sección de Estudios de la Zona Oceánica, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. A.A. 982 Cartagena de Indias D.T. y C., Colombia*

ABSTRACT

One of the more actual aspects of the nature sciences is connected with the needs to determine the mechanisms that will allow us to control the pollution and to preserve the environment.

In this frame, the CIOH is developing some works, related with the numerical modelation of the hydrodynamics in the Colombian Caribbean. This paper is the result of the initial phase of these investigations.

The main characteristics of the water circulation and the influences in the transport of pollutants in the internal bay of Cartagena have been studied. The results have been verified by means of nature measurements of the current drifts.

This is an important step in the numerical modelation with goal of its application in a system of control and monitoring of the marine environment. The model and its results will be used in the intercalibration of other ones. The transport block of this work is a part of the pollutant block of the future system.

RESUMEN

Uno de los aspectos más actuales desde el punto de vista de las Ciencias Naturales, está relacionado con la creciente necesidad de ubicar los mecanismos que permitan controlar la contaminación con orígenes antropogénicos y de conservar los medios afectados por ésta.

En este contexto, en el CIOH se vienen desarrollando trabajos relacionados con la modelación numérica de la hidrodinámica del litoral Caribe colombiano, siendo el presente trabajo producto de la fase inicial de tales investigaciones.

En el estudio se han analizado las principales características de la circulación de las aguas en la Bahía Interna de Cartagena, así como su influencia en el transporte de contaminantes flotantes. Los resultados obtenidos han sido verificados por medio de mediciones directas de las corrientes.

Se constituye este en un paso importante en el camino de la modelación numérica, con miras a su aplicación en un sistema de monitoreo y control del medio ambiente marino. El modelo utilizado y sus resultados serán aplicados en el proceso de intercalibración de otros que conformarán dicho sistema, siendo, igualmente, parte de su bloque de transporte de contaminantes.

INTRODUCCION

La bahía interna de Cartagena representa una región bastante complicada desde un punto de vista dinámico, cuyo intercambio de agua con la parte exterior se efectúa, principalmente, gracias al régimen de vientos y, en menor grado, a las mareas. Sin embargo, el grado de contaminación de la zona por desechos domésticos e industriales depende de la frecuencia con que las aguas se renuevan, lo que es determinado, básicamente, por la dirección de los vientos predominantes y las corrientes residuales generadas por las mareas. Se sabe, por ejemplo, que el

intercambio superficial con la bahía exterior se debilita bajo la acción de vientos del sur en un grado suficiente como para influir en la calidad de las aguas.

Entre los problemas que se pueden estudiar, relacionados con la región, podemos mencionar la definición de las rutas de migración de las sustancias contaminantes, provenientes de diferentes fuentes, con el objeto de estimar en una primera aproximación el aporte de cada una de ellas en el degeneramiento del medio ambiente. Para la solución de este problema es necesario conocer el régimen de la circulación. Son conocidos los rasgos generales de la dinámica de las aguas de la zona (Wang, 1982). Sin embargo, la solución de los complejos problemas modernos exige la aplicación de metodologías nuevas desde el punto de vista cualitativo.

En el marco del proyecto "Modelación Numérica de la Circulación Costera y su Aplicación en el Estudio del Transporte de Sustancias y Partículas Contaminantes en el Litoral Caribe Colombiano" se contempla la adaptación de uno de los modelos hidrodinámicos más completos en la actualidad (Hess, 1989) en la bahía de Cartagena, con el objeto de establecer un monitoreo ecológico de la región. Sin embargo, en este momento los trabajos en esta dirección se encuentran en una fase inicial y para la verificación de los resultados del modelo propuesto, se hace necesario, además de la simple comparación con mediciones naturales, una intercalibración del modelo. Este último procedimiento consiste en una comparación de los resultados obtenidos con diferentes modelos en una misma región. Esto aumenta en forma sustancial la confianza en los resultados del modelo a utilizar.

En este contexto, los cálculos efectuados para la realización del presente trabajo se ejecutaron con base en un modelo de Lonin (1993), el cual ha sido probado anteriormente en diferentes regiones del mundo.

El principal objetivo del presente trabajo es conocer el régimen hidrodinámico en la bahía de Cartagena bajo condiciones reales, para lo cual fueron realizadas mediciones de los parámetros hidrometeorológicos, así como estimar la influencia de diferentes fuentes de contaminación en la bahía interna de Cartagena bajo la acción de tales parámetros ambientales.

El trabajo contiene un resumen de la formulación del problema relacionado con el cálculo de la dinámica de las aguas y del transporte de partículas contaminantes de los tipos conservativo y pasivo, con flotabilidades que pueden ser neutra y positiva. Se da la respectiva descripción de la información utilizada y de la metodología de medición de las corrientes de Lagrange con ayuda de boyas de deriva, así como de los resultados de los cálculos y la verificación del modelo.

FORMULACION MATEMATICA DEL PROBLEMA

Para el alcance de los objetivos propuestos se ha estudiado la circulación en la bahía interna de Cartagena, forzada por la acción de las mareas y el viento. Sabemos que las corrientes termohalinas son mucho más débiles en comparación con las barotrópicas. Sin embargo, la estratificación de las aguas puede ejercer una influencia significativa en la formación del régimen de turbulencia y, por consiguiente, en la dinámica de las aguas en general. En los resultados esto se puede ver reflejado, ante todo, en el carácter de la distribución de los perfiles verticales de velocidad de las corrientes. A pesar de estas consideraciones, con miras al alcance de los objetivos propuestos nos limitaremos al análisis de la dinámica de un líquido barotrópico, dejando para trabajos posteriores la solución de la interrogante relacionada con las corrientes termohalinas.

De otro lado, consideraremos también que el viento sopla en forma uniforme sobre la región de estudio. Esta suposición está justificada dadas las dimensiones menores de la bahía interna. Por último, supondremos que la oscilación del nivel por las mareas no cambia a lo largo de la entrada a la bahía (entre Castillogrande y Manzanillo), igualmente, debido las dimensiones poco significativas de esta última. Realmente, para la profundidad promedio en la región de estudio $O(H) = 10$ metros, la velocidad de propagación de una onda gravitacional $c = (gH)^{1/2} \approx 10$ m/s, donde g - aceleración por gravedad. Así, el radio externo de deformación de Rossby $R = c/f$ para el valor del parámetro de Coriolis $f = 2\Omega \sin\phi$ (Ω - velocidad angular de la rotación de la Tierra; ϕ - latitud del lugar) cuando $\phi \sim 10^\circ$ norte será del orden de 400 kilómetros. Debido a que las dimensiones del área estudiada $O(L) \sim 1$ kilómetro es significativamente menor que el radio de Rossby, es obvio que podemos considerar que las variaciones espaciales del nivel del mar en todo el área son débiles. En la realidad, esta estimación permite afirmar que las oscilaciones del nivel del mar debidas a la marea ocurrirán en forma sincronizada para todos los puntos de la región de estudio.

El sistema de ecuaciones hidrodinámicas utilizado en el presente trabajo, está formado por ecuaciones completas de movimiento, las ecuaciones hidrostática y de continuidad, escritas en el plano "f" del sistema cartesiano de coordenadas

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + L(\mathbf{v}) + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v} + w \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + F(\mathbf{v}) + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} + \text{div} \mathbf{v} = 0 \quad (3)$$

$$K_z = c_\epsilon l^2 \left| \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} \right|. \quad (4)$$

$$L(\mathbf{v}) = (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} : \quad F(\mathbf{v}) = A_L \Delta \mathbf{v} : \quad l = \frac{\kappa}{H} l_\eta l_H l_0 : \quad l_\eta = \eta - z : \\ l_H = h + z :$$

$$l_0 = 1 - \beta_1 H^{-2} l_\eta l_H : \quad \kappa, \beta_1 = \text{Const.} :$$

$\mathbf{v} = (u, v)$ vector de la velocidad horizontal de las corrientes, con componentes u y v en los ejes x y y , respectivamente; w - componente vertical de la velocidad; ρ , P - densidad y presión hidrostática del agua; z - coordenada vertical, orientada hacia arriba desde el fondo ($z = -H$) hacia la superficie del mar ($z = \eta$), donde η - variación de la superficie libre con respecto a su posición media; K_z , A_L - coeficientes de viscosidad turbulenta vertical y horizontal; l - macroescala de los vórtices de turbulencia en el líquido, dada por la fórmula de Montgomery (Reid, 1957); ∇ y Δ - operadores bidimensionales de Hamilton y Laplace, respectivamente; c_ϵ - constante; t - tiempo. Los demás símbolos ya han sido definidos.

Para una densidad del agua de mar constante, el sistema (1) - (4) estará cerrado si son dadas las respectivas condiciones de contorno.

En la superficie del mar se da:

$$K_z \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} = \vec{\tau}_s / \rho : \quad P = P_{\text{atm}} : \quad w = \frac{d\eta}{dt} . \quad (5)$$

mientras que en el fondo:

$$K_z \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} = \vec{\tau}_b / \rho : \quad w = (\mathbf{v} \nabla) h . \quad (6)$$

donde, $\vec{\tau}_s$ y $\vec{\tau}_b$ - vectores de la tensión tangencial del viento y fricción en el fondo; P_{atm} - presión atmosférica sobre la superficie del mar (suponemos $P_{atm} = \text{Const}$); h - profundidad, medida con respecto a la posición media de la superficie, tal que $H = h + \eta$.

Las condiciones de contorno en los bordes laterales serán definidas posteriormente. Sin embargo, inicialmente veamos las transformaciones del sistema, que son importantes desde el punto de vista de la realización numérica.

En primer lugar, el área de integración con profundidad variable se traduce en una región con profundidad constante aplicando la siguiente transformación de "aplanamiento" del fondo

$$\theta = \frac{z - \eta}{H} \quad (7)$$

de tal forma que las nuevas coordenadas verticales θ oscilarán en el rango de $\theta = 0$ (superficie del mar) hasta $\theta = -1$ (fondo).

En segundo lugar, se justifica partir el sistema de ecuaciones (1) - (4) de acuerdo con procesos físicos, teniendo en cuenta que la moda gravitacional externa tiene una escala de variación temporal más rápida que la interna (en un medio estratificado) y que las corrientes generadas por el viento. En este sentido, escribiremos las componentes de velocidad (u, v) como la suma de sus valores verticales promedio (\bar{u}, \bar{v}) y sus desviaciones (u', v') . es decir

$$(u, v) = (\bar{u}, \bar{v}) + (u', v'). \quad (8)$$

Las velocidades promedio son determinadas con base en las expresiones

$$(\bar{u}, \bar{v}) = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\eta} (u, v) dz = \int_{-1}^0 (u, v) d\theta \quad (9)$$

y las desviaciones (u', v') son reemplazados por los cizallamientos verticales de velocidad \mathbf{s}_k en un espacio discreto: $\mathbf{s}_k = \mathbf{v}_{k+1} - \mathbf{v}_k = \mathbf{v}'_{k+1} - \mathbf{v}'_k$, donde k - índice del nivel de profundidad.

Entonces, conociendo los cizallamientos de velocidad \mathbf{s}_k es fácil pasar a los valores \mathbf{v}'_k con base en la expresión

$$\mathbf{v}'(-1) = \sum_k \theta_{k+1/2} \mathbf{s}_{k-1} ; \mathbf{v}'_k = \mathbf{v}'_{k+1} - \mathbf{s}_k ; \theta_{k+1/2} = (\theta_k + \theta_{k+1})/2. \quad (10)$$

ya que $\int_{-1}^0 \mathbf{v}' d\theta \equiv 0$.

Luego de integrar en la vertical las ecuaciones (1) - (3) teniendo en cuenta las condiciones de contorno (5) - (6), para la moda gravitacional externa obtenemos:

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{v}}}{\partial t} + \tilde{\mathbf{L}}(\bar{\mathbf{v}}) + 2\boldsymbol{\Omega} \times \bar{\mathbf{v}} = -g \nabla \eta + \tilde{\mathbf{F}}(\bar{\mathbf{v}}) + \frac{\tau_s - \tau_b}{\rho H} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \text{div}_L(\bar{\mathbf{v}} H) = 0. \quad (12)$$

donde se han hecho las siguientes suposiciones: $\tilde{\mathbf{L}}(\bar{\mathbf{v}}) = \int_{-1}^0 \mathbf{L}(\mathbf{v}) d\theta \equiv (\bar{\mathbf{v}} \nabla) \bar{\mathbf{v}}$:

$$\tilde{\mathbf{F}}(\bar{\mathbf{v}}) = \int_{-1}^0 \mathbf{F}(\mathbf{v}) d\theta \equiv A_L \Delta \bar{\mathbf{v}}.$$

Para las ecuaciones (11) - (12) es indispensable el cumplimiento de las siguientes condiciones de contorno en el borde costero $\partial G_{\text{coast}}$

$$(\bar{\mathbf{v}}\mathbf{n}) = 0; \quad \partial \bar{v}_l / \partial n = 0, \quad (13)$$

donde \mathbf{n} , \mathbf{l} - vectores normal y tangencial hacia $\partial G_{\text{coast}}$; el índice "l" para la velocidad media, significa que esta es la respectiva componente sobre el vector tangencial \mathbf{l} .

Las condiciones (13) caracterizan la impenetrabilidad del borde costero y el movimiento a lo largo de la frontera sin fricción (condición de deslizamiento).

En la frontera líquida es necesario determinar los valores del nivel de marea $\eta^*(t)$, dados a partir de observaciones. Sin embargo, los cálculos anteriores han demostrado que una condición de este tipo, tomada para la grilla del modelo de diferencias finitas usado no es suficiente, ya que impide el paso de las perturbaciones que vienen desde el interior del área en dirección hacia la frontera líquida. Efectivamente, el periodo de las ondas tipo hervidero (seethe) será determinado por una magnitud múltiplo de la relación L/c , siendo en este caso de $O(100)$ segundos. Estas ondas deberán salir libremente a través de la frontera abierta sin reflexión. Por ésto en el presente trabajo se ha usado la condición de mejoramiento de Orlandy con relajamiento (Davis, 1989)

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \frac{\partial \eta}{\partial n} = \gamma (\eta^* - \eta), \quad c = - [gH(x)]^{1/2} \quad (14)$$

donde γ - parámetro de relajamiento. El signo menos para "c" corresponde a la onda que sale a través de la frontera líquida.

Obviamente, a la condición $\eta = \eta^*(t)$ le corresponderá un valor $\gamma \rightarrow \infty$ en la fórmula (14). Por el contrario, cuando $\gamma = 0$ la condición (14) describe sólo el paso

de las ondas reflejadas. El estudio analítico de la ecuación (14) demuestra que el parámetro γ , cuyo sentido es inverso al tiempo de adaptación a las perturbaciones externas, debe tener un orden de frecuencia como el de las oscilaciones de marea. Así, por ejemplo para la onda M_2 es posible tomar $\gamma = 1.4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Para las componentes de velocidad se utilizan condiciones de frontera calculadas.

En la obtención de las ecuaciones correspondientes a los cizallamientos de velocidad, es necesario aproximar la ecuación (1) a una forma discreta en la vertical y escribir la ecuación para las capas k y $k+1$. Luego, restándole la primera ecuación a la segunda, obtenemos la buscada con la forma:

$$\frac{\partial \mathbf{s}_k}{\partial t} + \left[\mathbf{G} + \left(\frac{1}{\delta\theta_{k+1}} + \frac{1}{\delta\theta_k} \right) \frac{\mathbf{K}_z^{k+1/2}}{H^2 \delta\theta_{k+1/2}} \right] \mathbf{s}_k - \frac{\mathbf{K}_z^{k+3/2}}{H^2 \delta\theta_{k+1} \delta\theta_{k+3/2}} \mathbf{s}_{k+1} - \frac{\mathbf{K}_z^{k-1/2}}{H^2 \delta\theta_k \delta\theta_{k-1/2}} \mathbf{s}_{k-1} = \mathbf{F}_{k+1} - \mathbf{F}_k, \quad (15)$$

donde $\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 & -f \\ f & 0 \end{pmatrix}$; $\mathbf{F}_k = -\frac{1}{\rho} \nabla P + F'(\mathbf{v}) - L'(\mathbf{v})$; $F'(\mathbf{v})$, $L'(\mathbf{v})$ - términos que describen la difusión horizontal y la advección del impulso, respectivamente, teniendo en cuenta la operación de "aplanamiento" del fondo.

Las condiciones de contorno (5) - (6) para la ecuación (15) se pueden reescribir de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_z^{1/2} \mathbf{s}_0 / H \delta\theta_{1/2} &= \vec{\tau}_s / \rho && \text{cuando } \theta = 0 \\ \mathbf{K}_z^{kh+1/2} \mathbf{s}_{kh} / H \delta\theta_{kh+1/2} &= \vec{\tau}_b / \rho && \text{cuando } \theta = -1. \end{aligned} \quad (16)$$

Si en la frontera abierta eliminamos los terminos $F'(v)$, $L'(v)$, la ecuación (15) no requiere de condiciones de contorno en el borde líquido de la región de estudio.

En el modelo las condiciones iniciales pueden ser de cuasiperiodicidad, obtenidas luego de “sacar” el sistema del estado de equilibrio y de integrar durante algunos ciclos de marea.

Luego del cálculo de los campos de velocidad es posible obtener el transporte de sustancias contaminantes. En el presente trabajo se han estudiado sustancias pasivas y conservativas provenientes de una fuente de acción continua. Consideremos dos casos, en el primero la sustancia posee flotabilidad neutra y en el segundo positiva. El primer caso representa una aproximación para la sustancias solubles, el segundo representa, por ejemplo, un modelo de una mancha de petróleo en la superficie del mar. Las suposiciones hechas permiten estudiar el movimiento bidimensional (en el plano horizontal) de la sustancia.

El modelo de difusión turbulenta, fundado con base en la solución de la ecuación diferencial de tipo parabólico presenta algunas deficiencias, relacionadas con la velocidad infinita de la distribución de la sustancia, lo que resulta de la misma estructura de la solución de una ecuación de ese tipo. En la realidad, la sustancia se transporta con velocidad finita. Bajo escalas de tiempo y espacio determinadas, esta deficiencia no tiene un significado importante desde el punto de vista práctico, debido a que, con el alejamiento de la fuente la cantidad de sustancia disminuye rápidamente. Sin embargo, bajo las escalas utilizadas en el presente trabajo, es necesario emplear otra metodología para la solución del problema, como el Método de Trazadores de Lagrange. Este consiste en la observación del movimiento individual de las partículas, las cuales son equivalentes a moles de sustancia contaminante.

En el sistema de coordenadas de Lagrange la descripción del movimiento de N partículas es dada en la siguiente forma

$$\frac{d \mathbf{r}_i}{d t} = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_{2i}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (17)$$

donde $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i)$ - coordenadas de la partícula i; \mathbf{v}_1 - componente determinística del vector de velocidad del transporte, calculada esta última con base en un modelo hidrodinámico; \mathbf{v}_{2i} - componente probabilística, condicionada básicamente, por la turbulencia.

En los casos estudiados el vector \mathbf{v}_1 puede tener el significado de la velocidad promedio de las corrientes en sentido vertical, calculada por la expresión (9), o de la velocidad de las corrientes superficiales, es decir $\mathbf{v}_1(x, y) = \mathbf{v}(x, y, \theta=0, t)$. Al pasar de coordenadas de trayectorias de Euler a las de Lagrange, los valores del vector $\mathbf{v}_1(x, y, t)$ en un espacio con coordenadas x,y arbitrarias y continuas son calculados por el método de interpolación de pesos.

El vector \mathbf{v}_{2i} tiene componentes dadas por la expresión

$$\begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \end{pmatrix} = \sigma_u \mu(t) \begin{pmatrix} \cos \alpha(t) \\ \sin \alpha(t) \end{pmatrix} \quad (18)$$

donde σ_u - desviación estandar de la velocidad de las corrientes; $\mu(t)$ - "ruido blanco" con intensidad equivalente a la unidad; $\alpha(t)$ - fase probabilística (aleatoria). Las dos últimas magnitudes se determinan a partir de un generador de números aleatorios; el parámetro σ_u debe conocerse con base en los datos de mediciones naturales.

La fuente de contaminación ha sido colocada en un punto de la región de estudio con coordenadas (x_0, y_0) ; su capacidad de emisión (en unidades de cantidad de

partículas) la podemos determinar por la expresión $Q = Q_{\max} \Delta t/T$, donde Q_{\max} - cantidad máxima de trazadores; Δt - paso en el tiempo; T - tiempo de ejecución de los cálculos. De esta forma, conociendo la capacidad de una fuente real en unidades de velocidad de emisión de sustancia, la concentración de ésta puede considerarse proporcional a la cantidad de trazadores en una celda de la grilla de cálculo. Sin embargo, en nuestra investigación nos abstraemos de estudiar un tipo concreto de sustancia y nos limitamos a discutir el lado cualitativo del problema. En relación con esto, para nosotros es interesante sólo la distribución espacio - temporal de los trazadores en el área de estudio.

En las fronteras de la región de estudio establecemos condiciones de desaparición de la sustancia, es decir, consideramos que si un trazador alcanza la frontera de la misma, éste no participará más en el desarrollo del problema. Resaltamos igualmente que, debido a que la ecuación (17) contiene una adición estocástica, la solución del problema será más exacta mientras mayor sea la cantidad de trazadores que describe el proceso de propagación. En el problema analizado se supuso una $Q_{\max} = 6 \cdot 10^4$ partículas.

DESCRIPCION DE LA INFORMACION

Los datos utilizados pueden ser divididos en dos categorías: La primera de estas contiene los datos necesarios en calidad de condiciones externas de contorno (regímenes de viento y marea), la segunda contiene datos de observaciones realizadas con boyas de deriva, que permiten efectuar verificaciones de los resultados del modelo.

Para los cálculos fueron preparados datos de observaciones horarias sobre el nivel del mar, así como de la dirección y velocidad del viento, recogidas en la estación

hidrometeorológica del CIOH. El período analizado comprendió desde las 00:00 horas del 09 hasta las 12:00 del 29 de agosto de 1995. Debido a que el modelo es inicialmente “sacado” de su estado de equilibrio, se estudia en forma complementaria el tiempo de adaptación (desde las 08:00 del 08 hasta las 00:00 del 09 de agosto). Los datos correspondientes a este último período no fueron tenidos en cuenta en adelante.

En la Figura 1 se observa el diagrama progresivo del vector del viento luego de su suavizamiento por una promediación tripuntual, así como el comportamiento temporal de la velocidad según datos de observaciones reales luego de su suavizamiento y de su módulo. El último procedimiento es necesario debido a que la representatividad de los datos produce algunas dudas. La disminución del módulo de velocidad del viento, obtenida luego del suavizamiento (en 1.0 - 1.5 m/s) ofrece, al parecer, también un lado positivo, ya que el paso temporal del modelo (de segundos a décimas de segundo) es mucho menor que la discreción de las observaciones.

En la tabla 1 se dan los datos de frecuencia de las direcciones del viento durante el intervalo analizado. Es obvio el predominio de los vientos con rumbos oeste y sur, atípicos para la época del año en un contexto climatológico, y de las calmas, más propias de la región.

Tabla 1. Frecuencia (en %) de las direcciones del viento según datos de observaciones horarias en la estación del CIOH durante el período comprendido entre el 8 y 29 de agosto de 1995.

W	WSW	SW	SSW	S	SSE	SE	ESE	E
19.8	0.6	9.5	1.6	10.7	-	2.6	-	2.9

ENE	NE	NNE	N	NNW	NW	WNW	CALM	TOTAL
-	3.6	0.2	6.9	2.0	4.0	-	35.0	100

En la Figura 2 se ilustra sobre la variación del nivel del mar. Las amplitudes de las oscilaciones no superan los 20.0 centímetros, mientras que el nivel medio de las ondas de marea fue de 16.0 centímetros. Los resultados dados están referidos a dicho nivel medio.

Con base en estos datos podemos estimar la velocidad característica de los movimientos generados por las mareas en la bahía interna. Si tomamos el área de la superficie de la bahía igual a $0.538 \cdot 10^7 \text{ m}^2$, y el área de la sección entre Castillogrande y Manzanillo de 12725 m^2 , entonces para la amplitud dada anteriormente de las oscilaciones de la superficie del mar (onda M_2) podemos estimar la velocidad de las corrientes de marea cercana a 0.8 cms/s. Este valor demuestra un aporte poco significativo de los movimientos por marea en la formación del campo de corrientes, en comparación con el viento.

Los datos hidrometeorológicos descritos fueron interpolados linealmente en los intervalos de tiempo, correspondientes al paso temporal de cálculo Δt . Para la moda gravitacional externa $\Delta t_{\text{ext}} = 3.6$ segundos, para la moda interna $\Delta t_{\text{int}} = 36$ segundos.

Las observaciones directas fueron realizadas con ayuda de boyas de deriva, cuya posición fue fijada cada 20 minutos con ayuda de un GPS (Global Position System) y por triangulación con brújula. A pesar de la relativamente baja exactitud del posicionamiento con GPS (del orden de decenas de metros) se logró identificar un error sistemático cercano a los 500 metros. La corrección de este error se efectuó por tratamiento de las mediciones determinando la posición absoluta de la boya

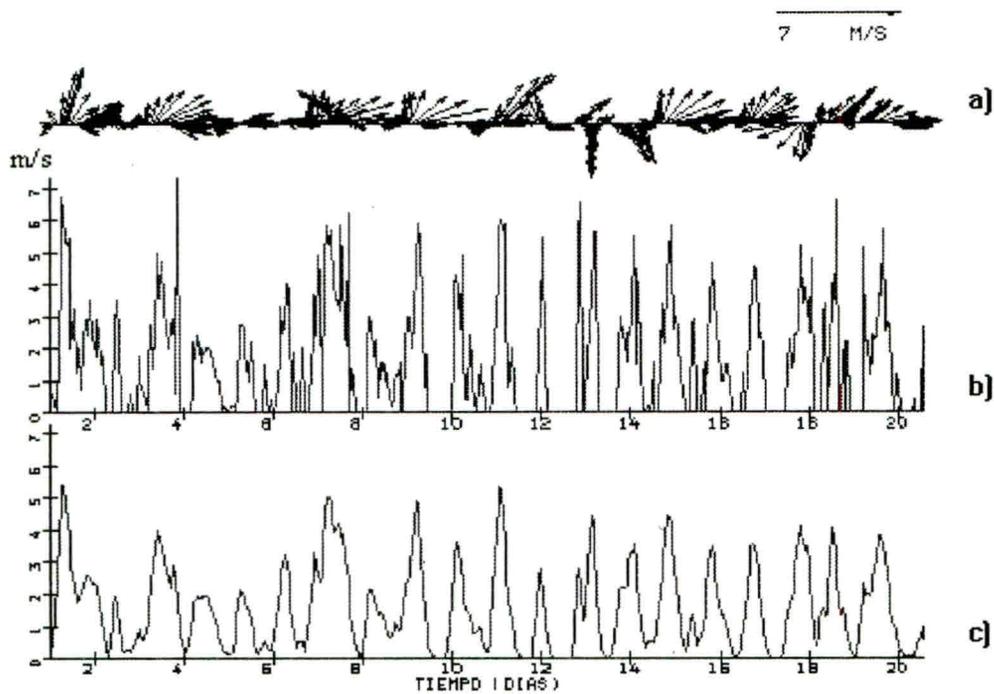


FIGURA 1. Comportamiento del vector de velocidad del viento a) y de su módulo b) y c). La Figura b) presenta los datos de las observaciones naturales, mientras que a) y c) - los resultados del suavizamiento.

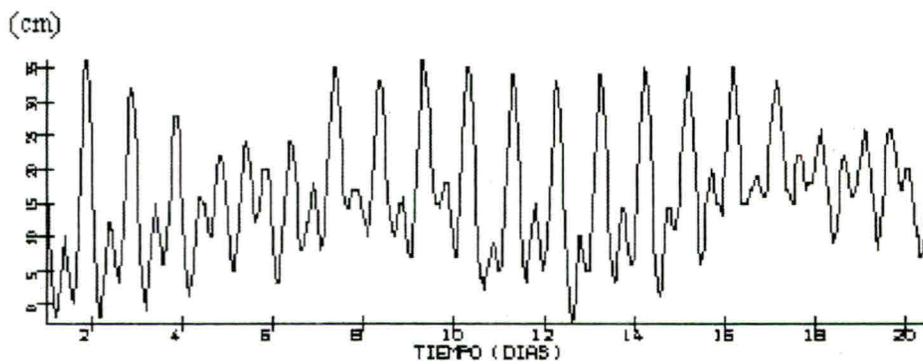


FIGURA 2. Comportamiento del nivel del mar según datos de la estación del CIOH.

(con relación al sistema de coordenadas geográficas). Esto fue posible hacerlo por comparación de las coordenadas geográficas de un punto de referencia con coordenadas obtenidas con ayuda del GPS, o por la triangulación efectuada con la brújula. Al no variar el vector del error sistemático del GPS en el espacio, este pudo ser anulado en todas las mediciones efectuadas consecutivamente con su ayuda.

En la Figura 3a (ver Discusión de Resultados) y en la tabla 2 se dan los resultados de los experimentos efectuados. La comparación de estos datos con los resultados de los cálculos se encuentra en la siguiente sección del trabajo. Diremos por ahora, que en la deriva de las boyas influye tanto el viento como la distribución vertical de las corrientes en la capa subsuperficial del mar. Obviamente, la deriva de la basura superficial será diferente de las boyas por esta misma causa, al igual que por estar las partículas menos pesadas de la basura sometidas a fluctuaciones de menor escala de las corrientes, que no actúan sobre las boyas. Debido a esta última causa, no fue posible estimar la magnitud de σ_u en la fórmula (18) a partir de los datos experimentales de las boyas.

Tabla 2. Resultados de las observaciones naturales, efectuadas con boyas de deriva (Ver también la Figura 3a).

Fecha	No. Tray	Inicio Obser.	Final Obser.	V_d (cms/s)*	α_d (en grados) ^o	Vel. del viento **	Dir. del viento **
09/08/95	1	14:05	15:25	11,33,15,8	287,17, 13, 353	0.5 - 1.0	W
14/08/95	3a	14:15	15:50	-	-	1.5 - 3.0	NW
	3b	14:15	15:50	-	-	1.5 - 3.0	NW
15/08/95	4a	14:10	15:50	12, 10, 15, 15,10	214, 159,119, 107,86	1.0 - 3.0	S, SW, W

	4b	14:23	14:55	8, 12	173, 169	2.0	SW
	4c	15:00	15:40	7, 18	189, 180	1.0 - 2.0	SW, W
17/08/95	6a	14:15	14:35	15	116	3.0	W
	6b	14:45	15:05	12	104	4.0	W
	6c	15:15	15:25	20	52	4.0	W
	6d	15:30	15:50	7.5	55	4.0 - 5.0	W
22/08/95	7	14:20	15:40	12, 18, 17, 19	309, 302, 318, 313	3.0 - 4.0	NW, N
23/08/95	8	14:15	15:35	35, 16, 29, 25	51, 13, 355, 358	5.0	W
24/08/95	9	14:15	15:55	5, 19, 4, 26, 9	29, 58, 168, 18, 339	3.0 - 5.0	W, NW
28/08/95	11	08:00	09:20	33, 24, 28, 33	120, 127, 112, 105	1.0 - 3.0	S - SW
29/08/95	12	08:30	09:50	-	-	0.0 - 2.0	N

- * - Velocidad de deriva entre mediciones consecutivas
- ° - Dirección de deriva entre mediciones consecutivas (en un sistema de referencia matemático)
- ** - Estos datos del viento han sido registrados en el momento de medición de las corrientes desde la lancha a una altura de 3.5 metros sobre el nivel del mar.

En lo relacionado con el tema sobre cómo comparar los datos de los experimentos realizados con las boyas, los cuales reflejan el transporte en una capa determinada, con los resultados de la modelación para niveles concretos, es posible proponer el siguiente procedimiento: La velocidad resultante del movimiento de la boya V_d puede ser dada en la forma

$$V_d = \frac{1}{S} \sum_i V_i S_i, \quad (19)$$

donde V_i - vector de la velocidad del viento y las corrientes en una distancia de la superficie, correspondiente a la posición media de cada una de las partes de la boya (flotador, cruceta y peso muerto); S_i , S - áreas de la sección efectiva de las partes de la boya y área general de la misma. La acción del viento sobre el flotador se calculó con base en la función logarítmica, correspondiente a las condiciones de estratificación neutral de la capa inferior de la atmósfera, próxima a la superficie acuática (near surface layer).

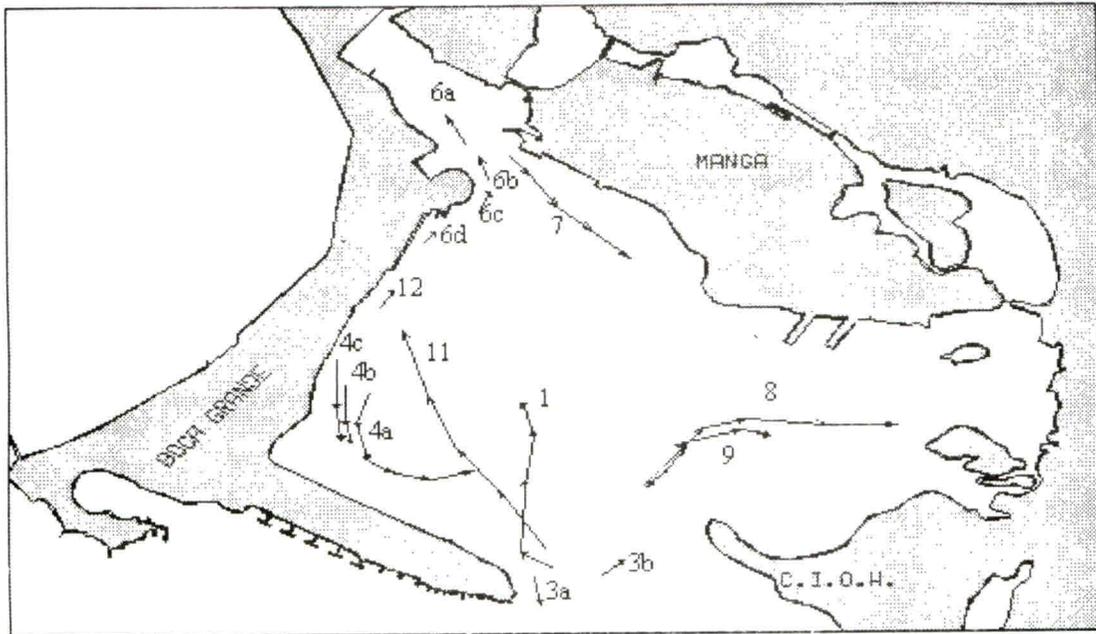
De modo que, de la parte derecha de la fórmula (19) es posible recalculer los resultados con el objetivo de obtener el transporte efectivo V_d , el cual puede ser luego comparado con los datos de los experimentos con las boyas.

DISCUSION DE RESULTADOS

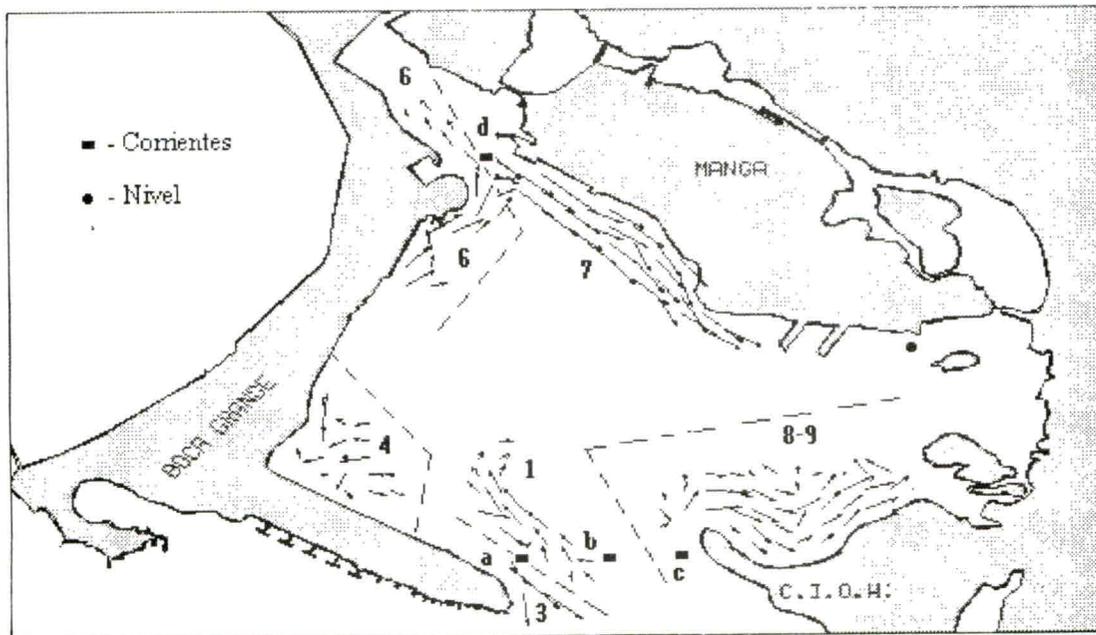
Como se registró en el párrafo anterior, el período estudiado se caracterizó por presentar condiciones meteorológicas atípicas desde el punto de vista climatológico. Esto se reflejó, principalmente, en el comportamiento del viento, el cual presentó predominio de las componentes oeste y sur (ver Tabla 1). Por esta razón, los resultados obtenidos deben relacionarse con tales condiciones.

Los resultados de las mediciones efectuadas con ayuda de las boyas de deriva, han demostrado que sobre su movimiento se registra una fuerte influencia del viento, lo cual se observa, especialmente, en el comportamiento de las boyas 8 y 9 (Figura 3a). En el caso de las boyas 1 y 11 se registra un movimiento que responde a la necesidad de rodear el bajo de la Virgen, complementando así la acción del viento sobre la boya, con el desvío de las corrientes que provocan las variaciones de la topografía submarina. En cuanto a las direcciones registradas en la bahía de Las Animas, la configuración estrecha de ésta provoca un comportamiento tipo canal, haciendo que las direcciones sean prácticamente las mismas bajo cualquier condición de viento por efectos de compensación.

Bajo determinadas condiciones, en la bahía de Cartagena se observa una ramificación del transporte efectivo, haciendo que, como en el caso de las mediciones 4 (a, b y c), en el oeste de la bahía, la dirección del flujo responde a la influencia de factores globales como la configuración de las costas, el relieve marino y la dirección del viento. Sin embargo, cabe anotar que, por regla, los efectos del transporte efectivo son observados en las capas inferiores a la superficie. Mientras mayor es la profundidad, su efecto aumenta. Por lo tanto los cálculos realizados mediante la aplicación de la fórmula (19) para cada uno de los sectores donde fueron lanzadas las boyas de deriva (Figura 3b), coinciden con las observaciones, a excepción del sector vecino al ángulo formado por la flecha de



a)



b)

FIGURA 3. Resultados de las observaciones con boyas de deriva en la capa superficial a) y del transporte efectivo, según la fórmula (19), bajo las mismas condiciones meteorológicas b). Las cifras corresponden a las respectivas observaciones en la tabla 2. En la Figura b) el punto representa el lugar de registro del nivel del mar, mientras que los cuadros corresponden a las corrientes.

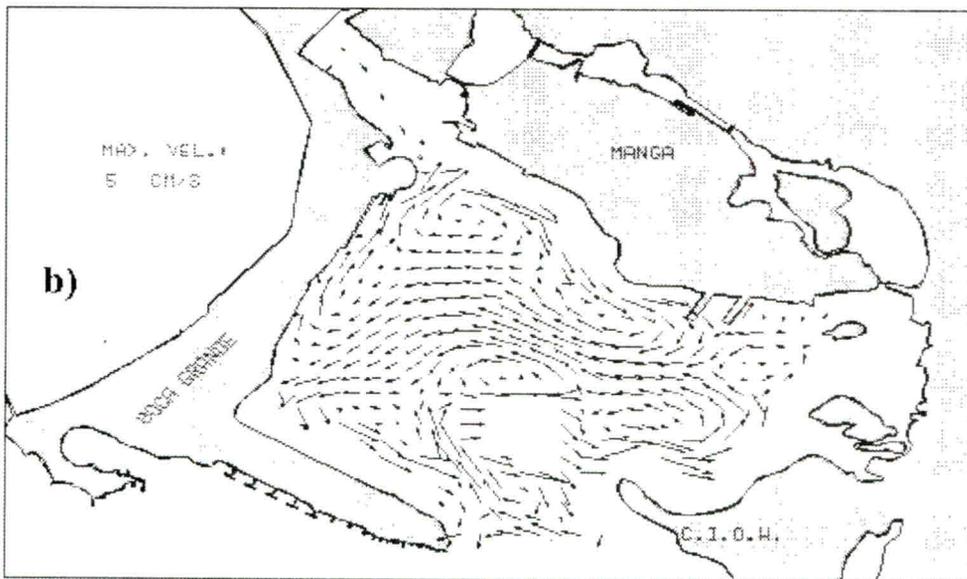
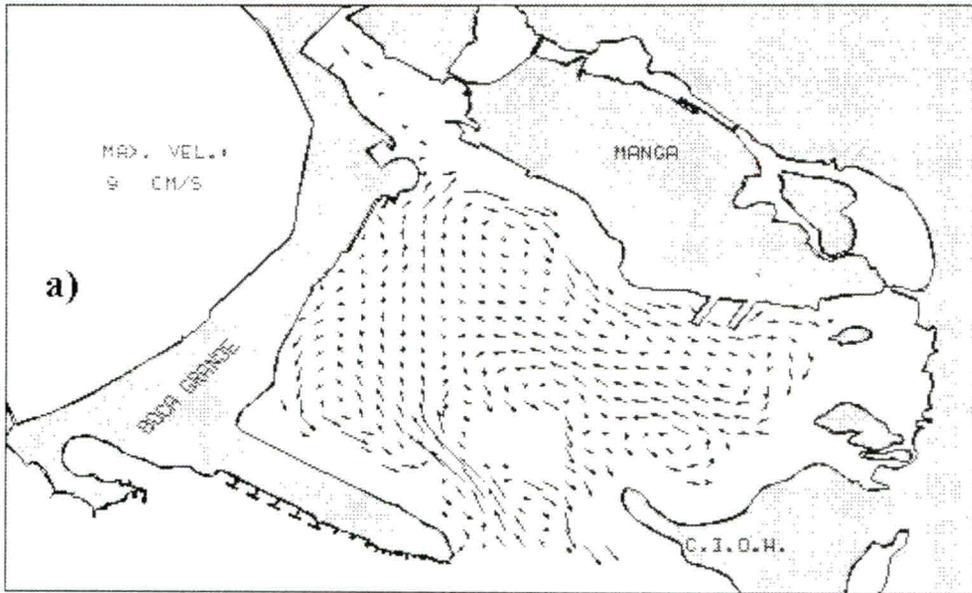
Castillogrande y Bocagrande (sector 4), donde las direcciones presentan algunas diferencias con los resultados del modelo.

Al parecer, las diferencias registradas en el sector 4 están relacionadas con el efecto producido sobre la acción del viento por las edificaciones ubicadas en el sector de Castillogrande. Es decir, el que las boyas en el sector 4 adopten direcciones correspondientes al transporte efectivo, el cual debe figurar no en superficie, como lo demuestran las Figura 4 y 5, responde a un debilitamiento de la velocidad del viento debido a la presencia de edificaciones altas en Castillogrande y Bocagrande, lo que provoca que el flujo de compensación aflore a la superficie en el sector 4, donde, bajo la acción de vientos del oeste y noroeste, se registra el debilitamiento más significativo de los mismos. En este sector, por lo tanto, la boya se mueve, impulsada principalmente por la corriente de compensación, antes que por el viento. Este efecto no ha sido registrado por el modelo, debido a que para su forzamiento se ha dado un viento uniforme sobre todo el área de estudio. Como se observa en la Tabla 2, el viento registrado en el sector 4 fue suroeste y sur, mientras que en la estación del CIOH el viento general fue oeste, siendo este último el utilizado para el forzamiento del modelo.

Algunos cálculos sencillos demuestran lo anteriormente expuesto. El 15 de agosto (a las 14:00 y las 15:00) se registraron en la estación del CIOH vientos con velocidades de 5.3 y 5.7 m/s. Para una correspondiente velocidad promedio de 5.5 m/s y un parámetro de rugosidad, calculado por la fórmula de Charnok, $z_0 = 0.6 \cdot 10^{-4}$ metros la velocidad del viento, convertida a la altura de medición en la lancha (3.5 metros) es de 5.0 m/s. Por su parte, el viento medido en la lancha fue de 1.0 - 3.0 m/s. Estas diferencias sustanciales en las direcciones y velocidades del viento conducen a la aparición de posibles contradicciones en los resultados, las cuales se explican de la forma expuesta a fin de evitar interpretaciones erróneas.

Las Figuras 4 presentan las corrientes a profundidades de 5.0 metros para diferentes direcciones del viento. La circulación a este nivel refleja las características de una circulación barotrópica (promedia en la vertical). Los resultados presentan que la circulación a este nivel es significativamente sensible a las variaciones del campo de viento. Así, por ejemplo, para el caso de una dirección oeste, como en el expuesto anteriormente y noroeste, se observa la formación de una corriente de gradiente a lo largo de Castillogrande, coincidiendo con lo registrado en superficie por la boyas de deriva para el sector 4 de la Figura 3a. La circulación por gradiente se ve afectada, así mismo, por la vorticidad del campo de viento, la cual en este caso no se ha tenido en cuenta, debido a la ausencia de información. Aunque las dimensiones de la bahía interna justifican dar un campo de viento uniforme, la presencia de edificaciones altas próximas a la costa, por lo visto, ejerce una influencia importante en la formación de las corrientes debido al debilitamiento del viento en el mar vecino, obviamente, en dependencia de su dirección.

La geometría de los diferentes sectores en los que podemos dividir la bahía interna de Cartagena, juega un papel importante en la formación de los campos de corrientes, tal y como se observa en las Figuras 4. Así por ejemplo, el sector occidental de la bahía, delimitado por las flechas de Castillogrande y Bocagrande, la Base Naval, la bahía de las Animas y el Bajo de La Virgen, presenta un fondo bastante plano y de profundidad significativa para la región en su conjunto. Este sector ofrece condiciones propicias para la formación de flujos de tipo barotrópico, orientados de acuerdo con la dirección del viento, que en la Figura 4a corresponden a las corrientes ubicadas al norte y sur del sector, así como de flujos de compensación, orientados en dirección contraria. Esto último se refleja claramente en las Figuras 4b, c y d, donde se observa que la mayor parte de este sector se encuentra dominada por flujos en contra del viento. Por su parte, el sector oriental



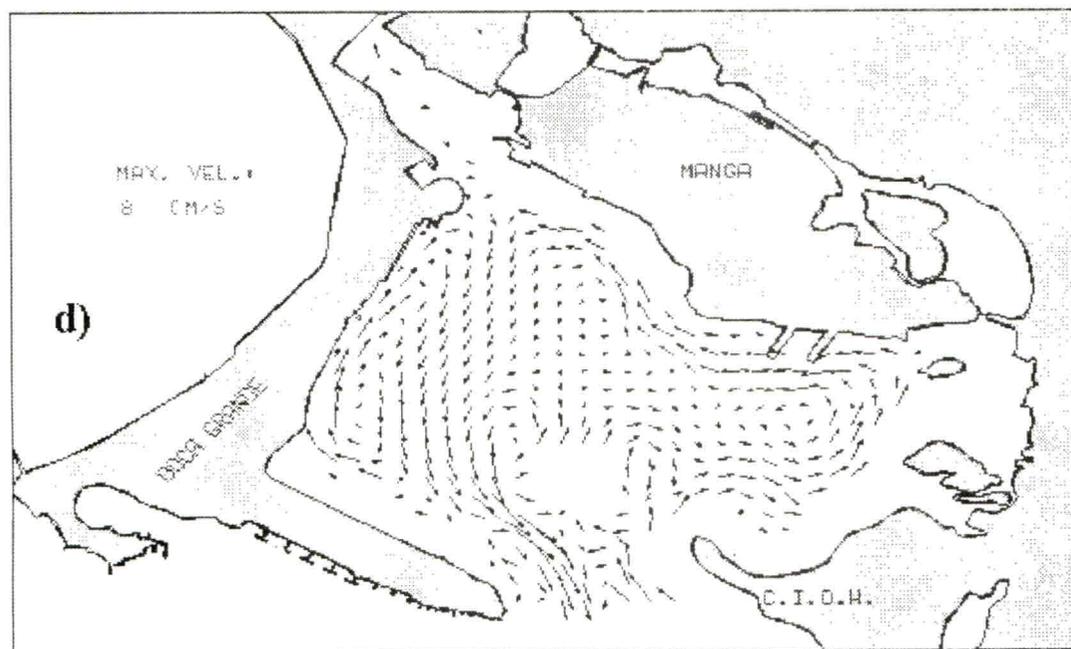
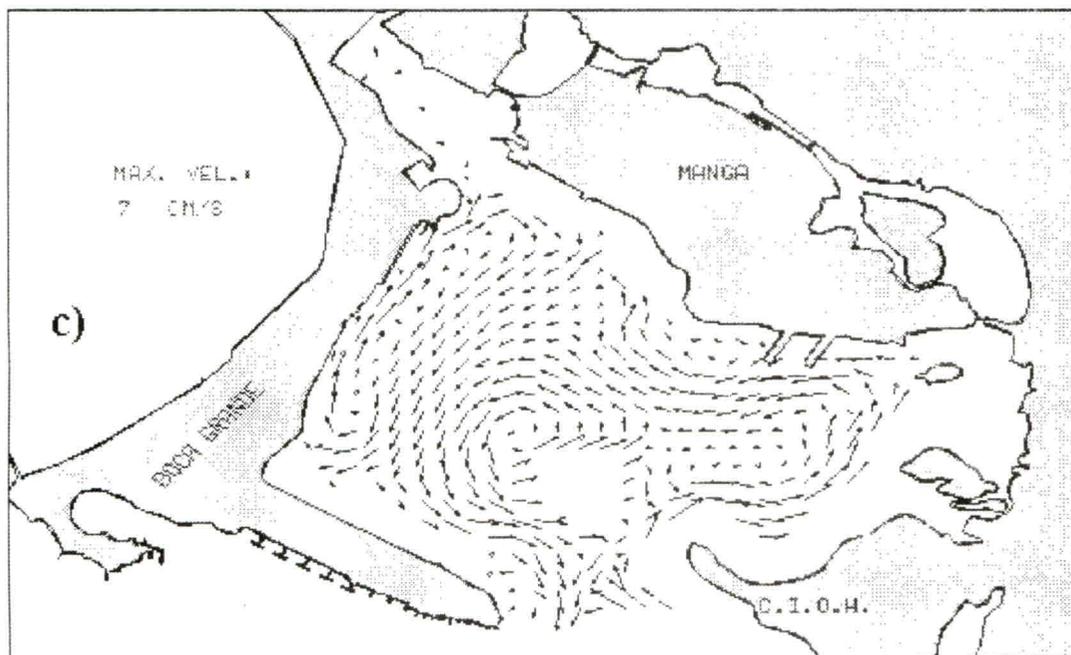


FIGURA 4: Campos de corriente a los 5.0 metros bajo la acción de vientos del noroeste a), oeste b), suroeste c) y sur d).

de la bahía ofrece una geometría mucho más complicada, que favorece la formación de vórtices de menores dimensiones, relacionados con la topografía del piso marino.

En cuanto al intercambio con la bahía externa, el flujo de compensación de esta hacia la bahía interna se realiza, especialmente, entre la punta de Castillogrande y el bajo de La Virgen, debido a su mayor profundidad. Debe anotarse que, bajo el efecto de vientos del oeste y el este, dicho flujo de compensación se debilita debido a la disminución obvia del flujo de Eckman en la capa superficial.

La Figura 5 presenta la variación temporal de las corrientes superficiales y el nivel del mar durante el período analizado. Los resultados plasmados en la gráfica hablan de la presencia de máximas velocidades en inmediaciones del canal de navegación (teniendo en cuenta los cuatro puntos estudiados). La variación del vector de velocidad se encuentra sometida a la influencia determinante del viento (Figura 1). Por su parte, las oscilaciones de la superficie del mar se presentan sincronizadas con los registros mareográficos de la estación del CIOH, lo que justifica las consideraciones realizadas anteriormente sobre este particular en el capítulo sobre la Formulación Matemática del Problema.

Los resultados presentados en la Figura 6 fueron obtenidos mediante la aplicación del modelo de trazadores, descrito anteriormente. Debido a que la fuente de contaminación fue diseñada como de acción continua, nos limitaremos a la descripción de los primeros cinco días del período analizado (del 9 al 13 de agosto de 1995). Fueron estudiados cuatro fuentes hipotéticas de contaminación: Base Naval, Muelle de Los Pegasus en la Bahía de Las Animas, Terminal Marítimo y la frontera líquida de la región, entre Castillogrande y la Isla de Manzanillo. En los tres primeros casos las fuentes fueron puntuales, mientras que en el último la fuente

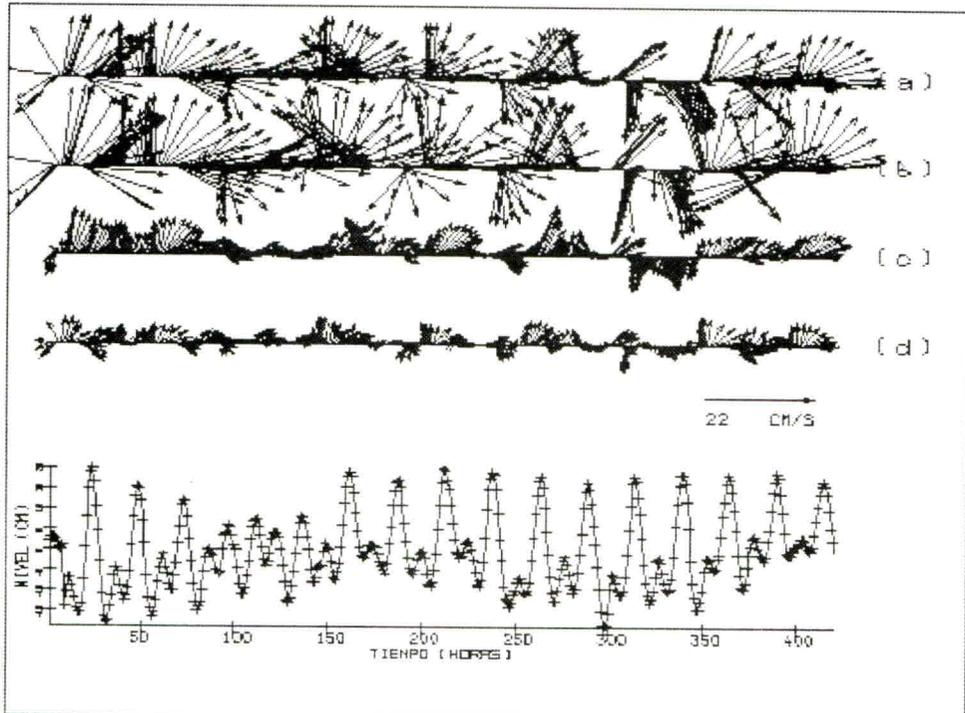


FIGURA 5. Variación temporal de las corrientes y el nivel del mar durante el periodo analizado en los puntos señalados en la Figura 3b.

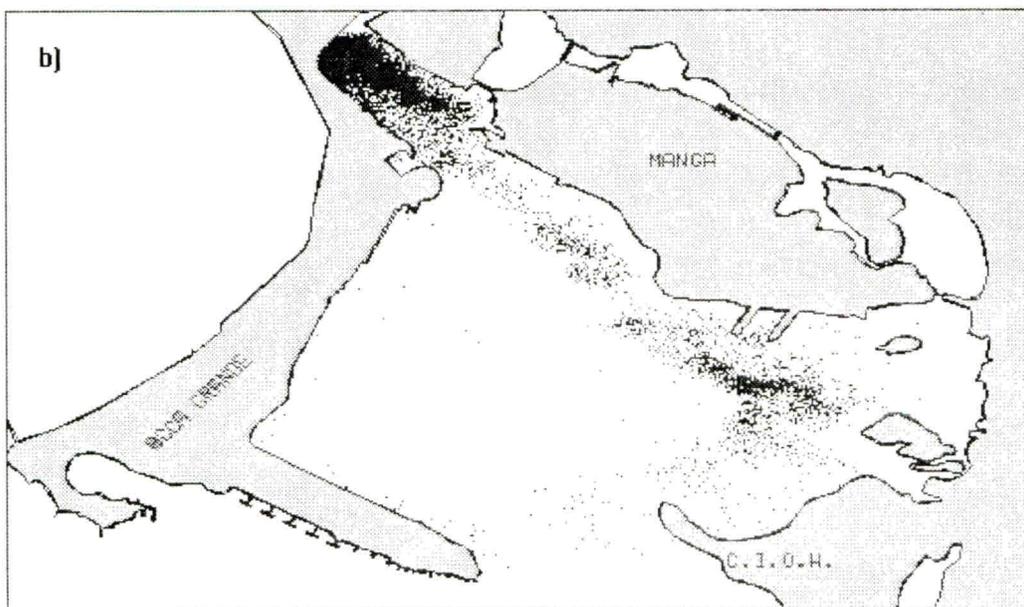
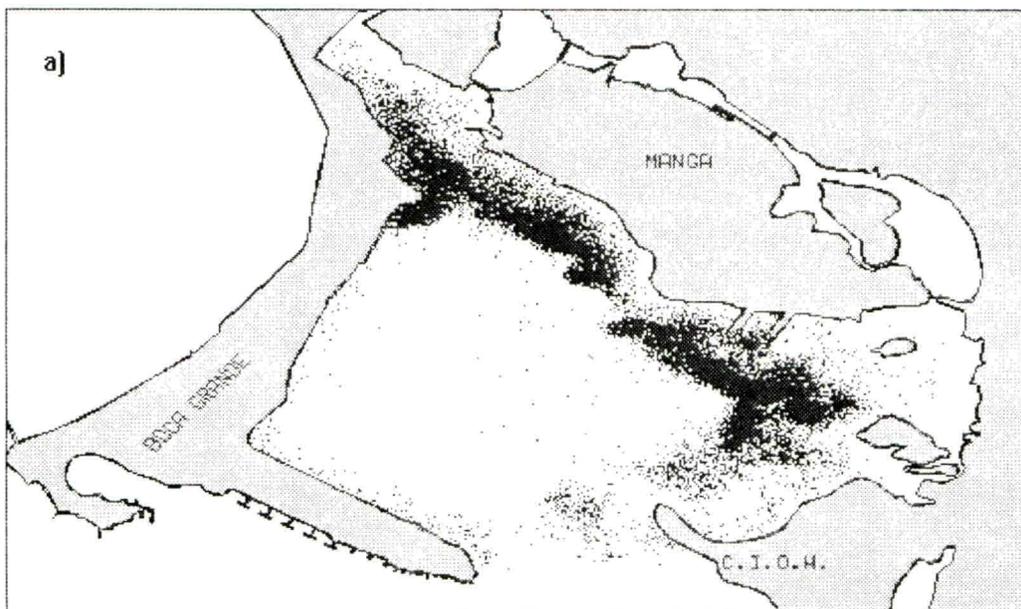
se encuentra distribuida a lo largo de la frontera líquida. El material estudiado está compuesto por basuras flotantes, sin tener en cuenta un tipo concreto de sustancia.

Al predominar los vientos con direcciones oeste y sur, la mayor cantidad de masa contaminante se concentró en las costas del sector oriental de la bahía. Sin embargo, la distribución de la sustancia presenta algunas particularidades, en dependencia de la posición de la fuente. En primer lugar, cuando la fuente se encuentra en la bahía de Las Animas, donde existe un intercambio débil con la bahía interna (Figura 5), la basura se concentra, prácticamente en su totalidad, sin salir de las vecindades de la fuente.

Por el contrario, cuando la basura es generada en la Base Naval o a la entrada de la bahía interna, bajo las condiciones meteorológicas presentadas durante el período estudiado, la principal masa de contaminantes se dirige hacia el este, acumulándose en la parte central de este sector, entre el Terminal Marítimo y las islas del Diablo y Chivos. Obviamente, si la basura es generada en el mismo Terminal Marítimo, esta presenta tendencia a acumularse en sus vecindades, tal y como se observó en el caso de la bahía de Las Animas.

CONCLUSIONES

Un resultado importante del presente trabajo ha sido la identificación de los principales procesos que rigen la formación del campo de corrientes en la bahía interna de Cartagena. Se ha establecido que la acción de las mareas es mucho menos significativa que la del viento. El carácter de la circulación depende en gran medida de la dirección de los vientos y sus variaciones. Esto preestablece exigencias adicionales que se deben hacer sobre la calidad de las observaciones meteorológicas que se efectúan en la bahía y sus alrededores. Queda sin resolver la



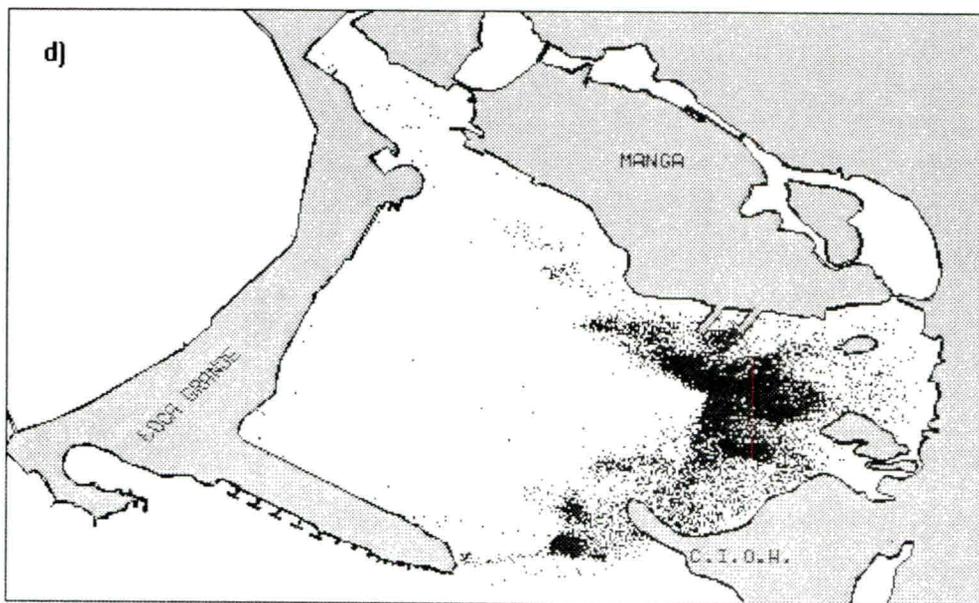
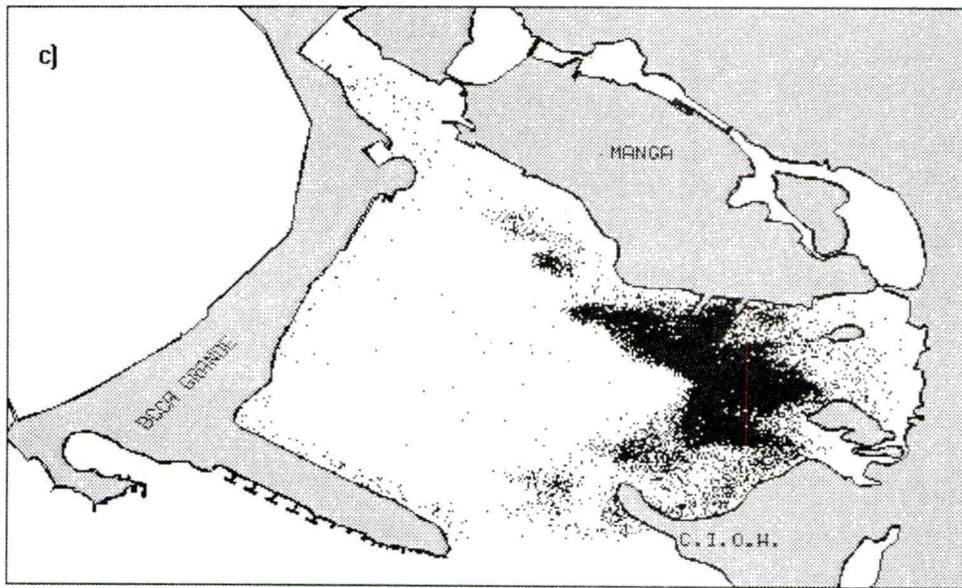


FIGURA 6. Resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo de trazadores para cuatro fuentes hipotéticas de contaminantes y las condiciones meteorológicas presentadas durante el período analizado: a) Fuente en la Base Naval. b) en la bahía de Las Animas. c) en el Terminal Marítimo. d) entre Manzanillo y Castillogrande.

siguiente cuestión: De qué manera las construcciones costeras influyen en el régimen de vientos que sopla en la capa más próxima a la superficie marina y qué tanto influyen las variaciones ocasionadas por tales construcciones en la formación de las corrientes. Aunque los resultados obtenidos demuestran la influencia de las edificaciones próximas a la costa, debe estudiarse más sobre qué tan importante es y de qué manera ocurre esa influencia.

A pesar de una mayor influencia del campo de vientos en la formación de las corrientes en comparación con los demás generadores de movimiento, en adelante se hace necesario estimar también el papel de la estratificación térmica en el régimen dinámico de esta región. Se sugiere realizar tales estudios con base en la aplicación de modelos hidrodinámicos más completos.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo sobre el transporte de basuras flotantes debe referirse a la época del año estudiada en concreto. Las condiciones ambientales, especialmente las relacionadas con el comportamiento del viento, propias de las demás épocas del año, serán estudiadas en trabajos posteriores. El modelo de trazadores propuesto en el presente trabajo, es un prototipo de un bloque que se utiliza para el estudio del transporte de una mancha de petróleo, que será empleado en el desarrollo de futuros proyectos en el CIOH.

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a los Suboficiales Víctor Bermúdez y Oscar Linares por su apoyo definitivo en la ejecución de las observaciones en el campo, al igual que al personal del CIOH que de una u otra forma hicieron aportes importantes para el desarrollo del trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- DAVIES, H. C., (1983), Limitation of some Common Lateral Boundary Schemes Used in Regional NWP Models. - *Month. Wea. Rev.*, Vol. 111. P. 1002 - 1012.
- HESS, K. W., (1989), MECCA Programs Documentation. NOAA Technical Reports NESDIS 46, Washington, D.C.
- LONIN, S. A., (1993), A Mathematical Model of the Coastal Water Dynamics in Boundary - Fitted Coordinates. *VINITI Publ.*, No. 3040 - 93, 29 p. (In Russian).
- REID, R. O., (1957), Modification of the Quadratic Bottom - Stress Law for Turbulent Channel Flow in the Presence of Surface Wind - Stress. - *V. S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board. Tech. Memor.*, No. 93 - 33 p.
- WANG, J. D., (1982), A Multidisciplinary Study of Cartagena Bay, Colombia. Part I. A Water Motion and Related Phenomena. Technical Report. UM RSMAS No. 82001. 102 p.