

INFLUENCIA DE LA MAREA, EL VIENTO Y EL APORTE FLUVIAL EN LA CIRCULACIÓN DE LAS AGUAS DE LA BAHÍA DE CIENFÜEGOS, CUBA.

Alain Muñoz Caravaca ^{1*}, Pascal Douillet ², Ovel Díaz García ¹, Sylvain Ouillon ² y Renaud Fichez ²

(1) Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, AP. No. 5 CP. 59350, Ciudad Nuclear, Cienfuegos, Cuba.

(2) IRD Noumea Centre, BP A5, 98848 Noumea Cedex, Nueva Caledonia, Francia.

(*) Autor correspondiente : Email : alain@ceac.cu ó alain@ciget.Cienfuegos.cu

RESUMEN

Se presentan los resultados obtenidos en la evaluación cuantitativa de la influencia de las mareas, el viento y los aportes fluviales en la circulación de las aguas de la bahía de Cienfuegos a partir de la modelación numérica y su comparación con estudios previos. Se describe el patrón general de circulación horizontal y vertical, determinándose las áreas de mayor importancia desde el punto de vista hidrodinámico. Se concluye que el intercambio está dado fundamentalmente por los flujos que entran y salen cada vez con las mareas, el aporte fluvial eleva su importancia en la misma medida que eleva su magnitud con relación a los flujos que representa el intercambio mareal. Los resultados obtenidos pueden de una herramienta útil para otras interpretaciones ecológicas, estudios ambientales ó la implementación de sistemas de alerta temprana en el área de estudio.

Palabras claves: estuarios; circulación hidrodinámica; modelos numéricos; bahías; ASW, Cuba.

ABSTRACT

It is show up the obtained results in the quantitative evaluation of the influence of the tides, the wind and the fluvial contributions in the circulation of the waters of Cienfuegos bay, starting from the numeric simulation and their comparison with previous studies. It is described the general water masses circulation in the vertical and horizontal plane, and it is also explained the main areas from the hydrodynamic point of view. It is concludes that the exchange is given fundamentally by the flows that enter and go out every time with the tides, the fluvial contribution elevates its importance in the same measure that elevates its magnitude with relationship to the flows that it represents the tides exchange. The obtained results can provide a useful tool for other ecological interpretations or environmental studies that are required in the study area.

Key words: estuaries; hydrodynamic circulation; numerical models; bays; ASW, Cuba.

Los procesos ecológicos que ocurren en las zonas costeras mantienen un estrecho vínculo con las características hidrodinámicas de estos espacios naturales. Todos los nutrientes, gases disueltos y materiales en suspensión se trasladan en el medio fluido, por lo que el conocimiento de las características dinámicas de este ofrece una oportunidad única para estudiar los lazos entre los procesos físicos y biológicos. La concentración de nutrientes por ejemplo, depende de la velocidad con que son renovadas las aguas, la geometría del sistema que encierra a las mismas, y en general a la circulación que domina este sistema. Por otro lado la actividad biológica en los sedimentos depende en gran medida de la velocidad con que las aguas corren en la interfase de ambos fluidos. Numerosos trabajos revelan la relación entre las características hidrodinámicas, biológicas y químicas de los ecosistemas en estudio, Delejsnejideer (1992, 1998), Santschi (1995), Blumberg *et al.* (2000), Laodong *et al.* (2000),

Monse (2002) y otros citados en las referencias de este documento.

La bahía de Cienfuegos tiene un antecedente único en el país en la modelación hidrodinámica de bahías y lagunas costeras cubanas. Tomczak y García (1975) desarrollaron un modelo tridimensional para el estudio de la dinámica de las aguas y la estabilidad de las mismas para evaluar el impacto de estos procesos en las pesquerías de camarón que históricamente ha sido un importante recurso económico de la provincia. Sin embargo este enorme salto en el conocimiento no tuvo una continuidad en su desarrollo y aplicación en el manejo integrado de este recurso natural. El alto costo computacional, el limitado desarrollo del país y en general de los medios informáticos al nivel mundial para entonces determinó que no pudiera desarrollarse un modelo hidrodinámico que fuera aplicable y útil en tiempo real, que permitiera predecir escenarios de vertidos

accidentales y la evaluación de proyectos que suponen cambios en la circulación estuarina y de la calidad de las aguas ó los sedimentos.

Numerosas investigaciones revelan el deterioro ecológico de la bahía de Cienfuegos entre los que se destacan: la reducción de las capturas de camarón blanco y rosado; la pérdida de especies o desplazamiento de otras (Rey Novoa, 2004); el incremento de las tasas de sedimentación y de los procesos erosivos en las cuencas hidrográficas (Alonso *et al.*, 2006); de los niveles de metales pesados en los sedimentos. En general estas investigaciones señalan a diferentes dimensiones de un proceso que tiene común denominador en el agua, que transporta todos los nutrientes y cargas contaminantes que a este sistema arriban y en la cual se transforman y biomagnifican. En estas condiciones la implementación de un modelo hidrodinámico en la bahía de Cienfuegos, en cuyo entorno se revela un acelerado desarrollo económico, se hace necesario. Aunque los modelos numéricos no constituyen una herramienta única en el análisis de los procesos ambientales, si contribuyen a una mejor interpretación de los mismos y bajo condiciones preestablecidas son poderosas herramientas de predicción de escenarios complejos y contribuyen a fortalecer el diagnóstico y monitoreo de los ecosistemas marinos y costeros como la bahía en estudio.

Este artículo tiene como objetivo presentar los resultados obtenidos en la evaluación cuantitativa de la influencia de las mareas, el viento y los aportes fluviales en la circulación de las aguas de la bahía de Cienfuegos a partir de la modelación numérica de las características hidrodinámicas.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Area de estudio

La bahía posee un área de 88.46 km² y un volumen de agua para el nivel medio del mar de 1.84 km³. Su forma es ovalada y está orientada de NO a SE. Posee 19 km de longitud máxima y 7.5 km en su parte más ancha, con una profundidad promedio de 9.5 m. De forma natural está dividida en dos lóbulos delimitados por el bajo "Las Cuevas" que tiene una profundidad promedio de 1.5 m. Presenta un estrecho y sinuoso canal de acceso con una longitud de 3 600 m y profundidades entre 30 y 50 m en el centro, limitado por dos puntas, al este por Punta Los Colorados situada a los 22°02'04" Latitud Norte y 80°26'29" Longitud Oeste y al oeste por Punta Sabanilla ubicada a los

22°02'28" Latitud Norte y 80°27'36" Longitud Oeste (Fig. 1). En toda la extensión de la bahía existen 50 puntas, 20 ensenadas o caletas y 14 cayos, siendo los más importantes Cayo Carenas, Cayo Ocampo y Cayo Alcatraz, lo cual expresa la complejidad del espacio a modelar numéricamente (Anónimo, 1978).

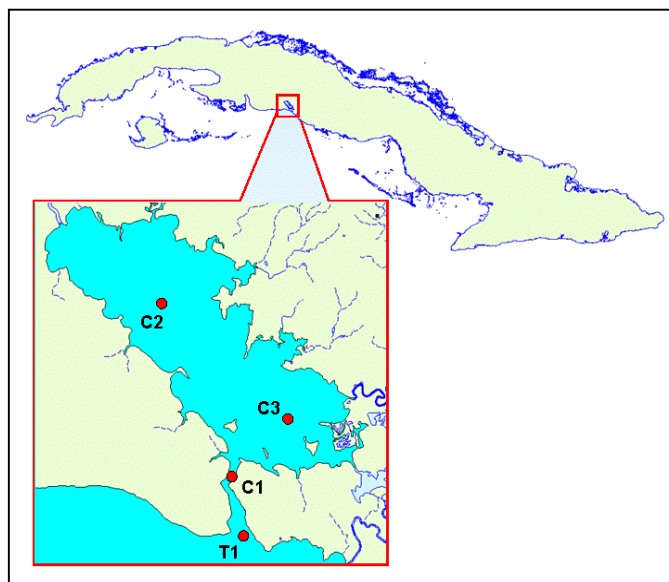


Fig. 1. Mapa de localización de la Bahía de Cienfuegos, Cuba.

Cuatro ríos vierten sus aguas en la bahía de Cienfuegos ellos son: el Caunao, el Arimao, el Damují, y el Salado, los cuales modifican la estructura salina de la bahía así como aportan una considerable carga contaminante al regar con sus aguas grandes extensiones de tierras sembradas en su mayor parte de caña de azúcar y colectar además la mayor parte de los residuales del desarrollo industrial de la provincia (Tur y Becerra, 1991; Rey Novoa, 2004).

La provincia de Cienfuegos como el resto del país esta sujeta a las variaciones estacionales propias del clima tropical, con dos estaciones climáticas bien definidas (Arecas, 1986; Araujo, 1988). Un periodo poco lluvioso entre Noviembre y Abril, con promedio de lluvias entre 1994 y 2001 de 59.6 mm, y otro periodo lluvioso, con el resto de los meses y un promedio de precipitación 4 veces superior al anterior con 217.6 mm. La salinidad superficial, como variable representativa de los procesos de mezcla del agua dulce proveniente de las cuencas y las precipitaciones, puede agruparse de manera similar a las estaciones climáticas mientras la salinidad en el fondo del cuerpo de

agua se mantiene invariable la mayor parte del tiempo, (Briantsev y Machado, 1970; Seisdedo y Muñoz, 2005). Por esta razón los experimentos numéricos desarrollados consideran ambos periodos, el lluvioso y el seco.

Modelo numérico.

El modelo numérico empleado se denomina MARS3D, desarrollado por la División de Medio Ambiente y Planificación Costera del IFREMER, Francia para aplicaciones en ambientes estuarinos, bahías y embalses. Sus principios son descritos completamente en Lazure *et al.*, (1991, 1998) y Planque *et al.*, (2004), con una aplicación sobre el Golfo de Vizcaya. MARS3D ha sido usado también en otras configuraciones acoplado con modelos biogeoquímicos en el Golfo de Vizcaya (Loyer *et al.*, 2001), sobre el estuario del Río de la Plata (Huret *et al.*, 2005) y en el lago de Nueva Caledonia en el Pacífico tropical (Douillet 1988, 2001).

El modelo MARS3D simula la circulación oceánica desde la zona costera hasta unos cientos de kilómetros mar afuera. Las ecuaciones hidrodinámicas que emplea este modelo se basan en el conjunto de ecuaciones reconocidas como Ecuaciones Primitivas de Navier Stokes, Ec. (2.1). La solución de este sistema de ecuaciones determina el campo de velocidad en el dominio de trabajo considerado y la solución de la ecuación de continuidad permite obtener la elevación del nivel del mar y la velocidad vertical correspondiente.

Ecuación del movimiento

$$\frac{\partial q}{\partial t} + (\nabla \cdot q)q = f - \frac{1}{\rho} \nabla p + D \quad (2.1)$$

donde:

- q = (u, v, w) vector velocidad
- f = parámetro de Coriolis = $2 \cdot \omega \cdot \sin \varphi$ siendo ω velocidad angular de rotación de la Tierra y φ la latitud.
- ρ = densidad del agua ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
- p = presión del fluido
- = Vector de difusión =
- $D_i = \frac{\partial}{\partial x} \left[N_x \frac{\partial q_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[N_y \frac{\partial q_i}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[N_z \frac{\partial q_i}{\partial z} \right]$

siendo N_x, N_y, N_z los coeficientes de difusión horizontal y vertical

Ecuación de continuidad

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \left[\frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} \right] = 0 \quad (2.2)$$

En las ecuaciones anteriores las cantidades u, v y w son los componentes de la velocidad que caracterizan las corrientes del mar, y p es la presión del agua. Estas son las cuatro incógnitas que necesitan ser determinadas para dar solución al sistema de ecuaciones planteado. Este conjunto de ecuaciones es solucionado sobre la base de dos consideraciones clásicas: la aproximación de Boussinesq y la aproximación hidrostática (Nihoul, 1984; Blumberg y Mellor, 1987; Ruddick *et al.*, 1995). Para integrar las ecuaciones el modelo utiliza dos esquemas: el método de Dirección Implícita Alternado, ADI, (Leendertse, 1967), y el esquema en Diferencias Finitas (DF). El esquema DF es utilizado para la discretización espacial y el ADI para la discretización temporal.

Discretización del dominio de trabajo.

La discretización espacial de las ecuaciones está basada en el esquema de cuadrícula C de Arakawa (Messinger y Arakawa, 1976). Una rejilla regular, cuadrada para el desarrollo de los cálculos en diferencias finitas con dimensión 100 m constituye el dominio computacional, que resulta en una gran matriz de 37e3 nodos. La resolución seleccionada es suficiente para resolver las variaciones de la línea costera en particular en la entrada del canal de entrada, por la importancia que reviste en la dinámica general de la bahía con un gasto de tiempo de cálculo óptimo, (Blumberg y Mellor, 1987; Hearn y Holloway 1990; Lazure y Salomon 1991; Deleersnijder, 1998).

La profundidad en cada nodo se obtiene por la interpolación de los datos digitalizados. La red vertical toma 10 niveles distribuidos porcentualmente de la siguiente forma:

- sig(1)= 0.05, sig(2)= 0.15, sig(3)= 0.25, sig(4)= 0.35,
- sig(5)= 0.45, sig(6)= 0.55, sig(7)= 0.65, sig(8)= 0.75,
- sig(9)= 0.85, sig(10)= 0.95

Siendo sig(1) la capa más cercana al fondo y sig(10) la superficial.

Factores de fuerza y condiciones de frontera.

Dado el carácter semidiurno de la marea en Cienfuegos para la formación de la onda como condición de frontera al exterior de la bahía fueron

considerados 5 componentes: M_2 , N_2 , S_2 , K_1 y O_1 , originalmente medidos en el Faro Punta Colorados (Fig. 1), durante el año 1998.

La velocidad del viento considerada fue temporalmente variable sobre todo el dominio, a partir de los datos medidos en la estación meteorológica del Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, durante el periodo 1974 – 2001 empleándose el conjunto de datos del año 1998, (Usagaua, 1998), a fin de coincidir con los datos de marea. Los vientos provenientes del primer cuadrante representan aproximadamente el 60 % de los registrados, mientras un 25% aproximadamente proviene del cuarto cuadrante. Las velocidades de los vientos generalmente no son grandes. La mayor frecuencia (50%) durante el año se observa para vientos con velocidades entre $1 - 3 \text{ m.s}^{-1}$ y para velocidades entre $4 - 8 \text{ m.s}^{-1}$ el 25%, por lo que las velocidades superiores tienen una baja frecuencia de observación. La velocidad media anual del viento es 3.4 m.s^{-1} , y los máximos se alcanza en las temporadas ciclónicas con registros de hasta 204 m.s^{-1} , durante el paso del huracán Michelle el año 2003.

El modelo se implementó para aportes fluviales variable y constante. Para evaluar la importancia del aporte de los ríos a la dinámica de las aguas de la bahía se consideró el aporte de cada uno constante en todo el periodo de simulación empleando el gasto medio histórico correspondiente en el periodo 1990 – 2000. Los valores considerados son: Damuji $12 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, Salado $1.5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, Caunao $7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ y Arimao $2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Como valor de salinidad inicial fuera de la bahía se ha considerado $S_0 = 35.5 \text{ psu}$, valor normal de la fosa de Jagua que alimenta a la bahía de Cienfuegos. La densidad de las aguas se tomó $1027.34 \text{ kg.m}^{-3}$.

Se analizaron tres condiciones:

- 1) todos los factores considerados (viento, aporte de los ríos y la marea)
- 2) tres veces el flujo de los ríos ($3\sigma_r$)
- 3) un tercio del flujo medio de los ríos ($1/3\sigma_r$)

Estos casos pueden tomarse como cercanamente reales a los procesos normales de intercambio en un periodo lluvioso ó seco respectivamente. No se analizan casos extremos como las inundaciones de 1988 ó el paso de los huracanes acompañados de grandes precipitaciones.

Se seleccionaron 3 puntos de interés para la evaluación de los resultados del modelo los que se

identifican en la figura 1 como C1, C2 y C3. El punto C1 se corresponde con el canal de entrada de la bahía que modula la dinámica de las aguas al ser el único espacio de intercambio con el mar Caribe, el punto C2 se ubica al norte de la bahía en la cercanía del río Damuji y del área industrial de la ciudad, en particular de la refinería de petróleo, lo cual revela por si mismo su importancia, el punto C3 se localiza en el centro del lóbulo sur y tiene como objetivo fundamental comparar sus características hidrodinámicas con el lóbulo norte y derivar criterios para el manejo de este sector de la bahía.

Validación del modelo.

Como criterio de validación del modelo se consideró el grado de reproducción de la onda de marea construida a partir de las: M_2 , N_2 , S_2 , K_1 y O_1 , y el efecto de amplificación que sufre la misma en su paso por el canal de entrada reportado en Anónimo (2005).

Se realizaron mediciones de la velocidad de las aguas en el canal de entrada por un periodo del 13 al 20 de Abril del 2006, con un correntómetro: Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP RDI WorkHorse 300 kHz) con registros de velocidad cada 10s y cada un metro de profundidad, determinando la estructura vertical de las corrientes. Estas mediciones fueron comparadas con las obtenidas por el modelo en condiciones de flujo variable de los ríos para el mismo periodo.

Los resultados experimentales fueron también comparados con mediciones realizadas durante las investigaciones realizadas en 1975 y 2007 para el estudio del emplazamiento del canal de acceso y obras hidrotécnicas de la refinería de petróleo Camilo Cienfuegos (Anónimo, 1979), empleándose como medida el error standard de la diferencia entre medias con significación 0.05.

RESULTADOS

La onda de marea proveniente del Caribe al entrar por el canal de la bahía de Cienfuegos conserva su carácter semidiurno, no sufre cambios significativos en relación a la fase original y si una ligera amplificación como resultado del paso por el canal (Fig. 2). La amplificación promedio observada en un ciclo completo es aproximadamente de 6 cm. Este comportamiento es considerado criterio de validación del mismo por cuanto se reproduce el fenómeno de amplificación registrado por el Servicio Hidrográfico y Geodésico de nuestro país

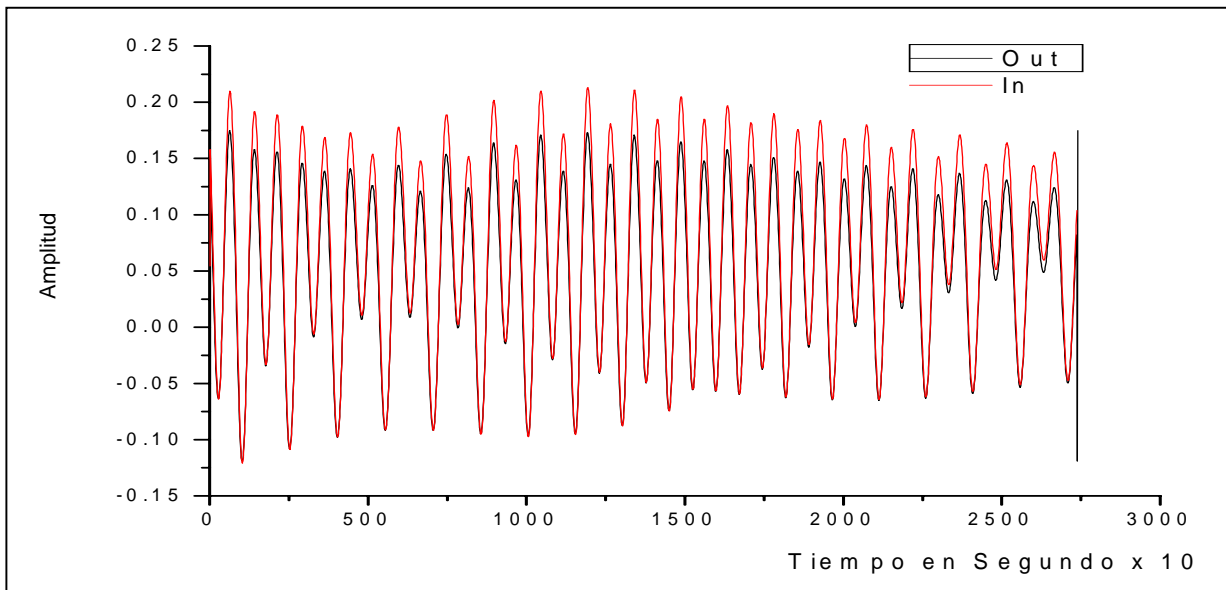


Fig. 2. Variación del régimen de marea fuera y dentro de la bahía de Cienfuegos, donde se visualiza el efecto amplificador del canal de entrada y la conservación de la fase de la onda de marea.

(Anónimo, 2005). La amplitud máxima de la marea en el período simulado fue de 0.21 m y la mínima de -0.19 m, lo cual está en correspondencia con el comportamiento real de la marea en los primeros meses del año. No existen diferencias significativas entre los resultados del modelo numérico y las características de cada una de las componentes determinadas a partir de los datos reales (Tabla 1).

Tabla 1. Principales componentes de marea empleadas (amplitud y fase) para la simulación y resultados obtenidos por el modelo numérico y el análisis de la marea real.

Componente	Amplitud		Fase	
	Real	Modelo	Real	Modelo
M ₂	12.18	12.11	261.01	261.0
N ₂	3.45	3.42	257.83	257.7
S ₂	4.07	4.07	239.15	239.2
K ₁	2.83	2.83	191.98	192.0
O ₁	2.88	2.88	238.20	238.0

En el lóbulo norte durante el llenante las aguas entran en dirección noroeste y giran contrario a las manecillas del reloj, bañando la costa occidental de

la ciudad, la parte más norte de este lóbulo y buscando la costa más occidental salen en dirección al canal de entrada de la bahía (Fig. 3). En el lóbulo sur, por el contrario, las aguas al entrar toman dirección noreste, giran en el sentido de las manecillas del reloj y buscan el canal de entrada de la bahía siendo este movimiento común para toda la columna de agua.

Durante el vaciante la circulación superficial es hacia el canal de entrada en toda la bahía (Fig. 4). La capa más profunda mantiene un sentido de dirección correspondiente a la fase de marea en curso, si es llenante se observa como la masa de agua presiona en dirección de las costas y en las áreas menos profunda empuja a la capa superficial, actuando como lógico mecanismo de conservación de la masa dentro de este ecosistema, en vaciante toda la columna de agua mantiene igual movimiento hacia el canal de entrada de la bahía (Fig. 5).

La presencia del bajo entre Cayo Carenas y Punta La Cueva, marca un área de conjunción de las aguas de ambos lóbulos, sobre el que se manifiesta una circulación que alterna en función de la mase de marea.

En el canal de entrada de la bahía la dirección de las corrientes está marcada por la fase de marea y por la propia configuración del canal que al ser tan estrecho obliga a las aguas a mantener una

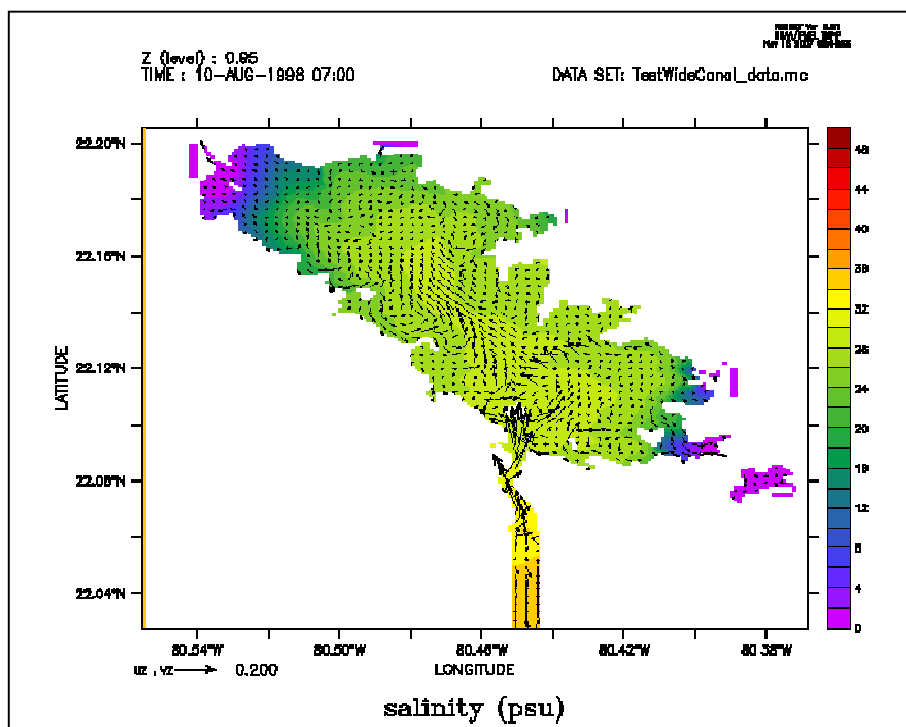


Fig. 3. Patrón de circulación de las aguas en la capa 1 representativa del fondo, obsérvese como el sentido de dirección de las aguas se mantiene en todo el espacio hacia el interior de la bahía correspondiendo a la fase de llenante ó flujo.

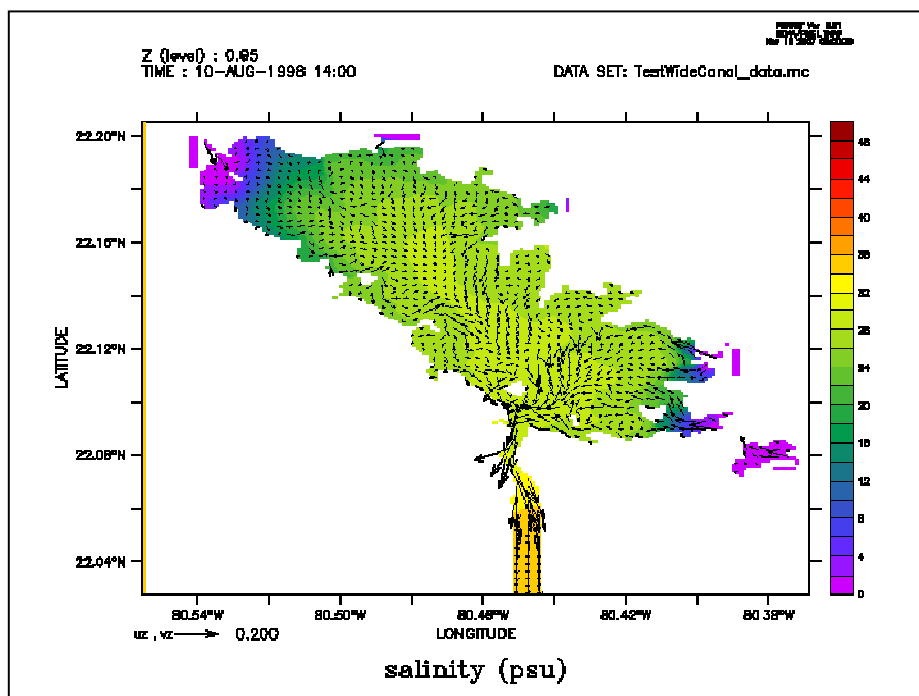


Fig. 4. Patrón de circulación de las aguas durante el llenante en la capa 10, representativa de la corriente superficial demostrando el movimiento de toda la columna de agua en el mismo sentido de en toda la bahía.

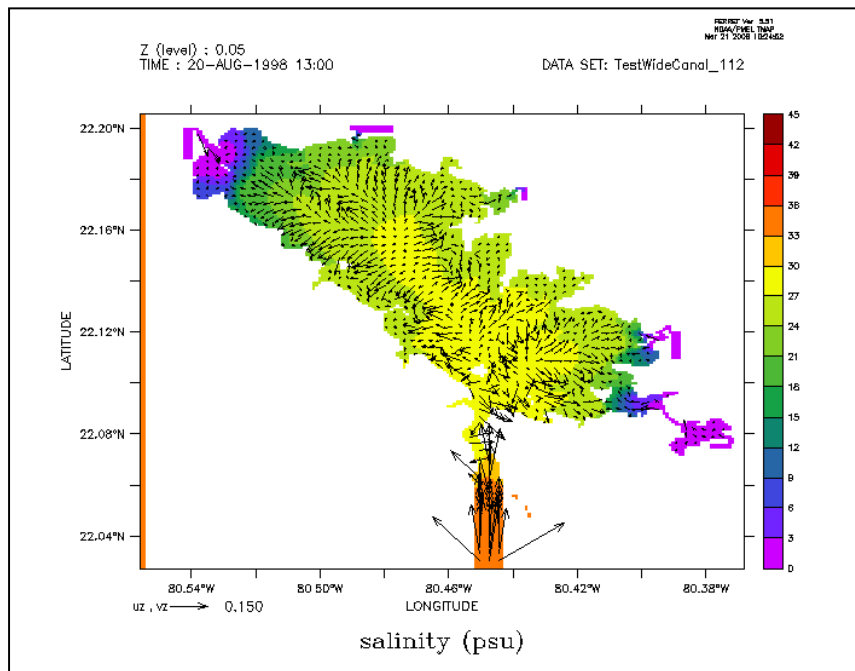


Fig. 5. Circulación de las aguas en el nivel de fondo durante el refluo ó vaciante, obsérvese un movimiento contrario al correspondiente en la fase al presionar el flujo de agua proveniente del mar Caribe por debajo y así mantener el volumen total de la bahía.

dirección predominante (Fig. 6). La velocidad media en canal al nivel de superficie (2 m) según el modelo y considerando un flujo variable del aporte fluvial, es 0.166 m.s^{-1} con rango de $0.037 - 0.408 \text{ m.s}^{-1}$, mientras los datos experimentales resultan en un valor medio de 0.159 m.s^{-1} y rango de $0.07 - 0.382 \text{ m.s}^{-1}$, cumpliéndose la hipótesis de nulidad con significación de 0.05. No existen diferencias significativas entre la media muestral experimental y de aquella obtenida a partir del modelo para cada nivel de profundidad con significación de 0.05, lo cual significa que el modelo reproduce la velocidad en el canal de entrada y garantiza la reproducibilidad del proceso dinámico en el dominio.

La velocidad superficial en el canal de entrada de la bahía (punto C1), fue siempre superior a las obtenidas C2 y C3 (Tabla 2). Considerando todos los factores, la velocidad media en el punto C2 fue superior a C3 e igual si se considera la condición de aporte fluvial mínimo, mientras que para la condición de mayor aporte el punto C3 resultó alcanzar mayor velocidad. En todos los casos el máximo de velocidad se alcanza siempre a la mitad de cada fase de marea, ya sea en llenante ó vaciante y la mayor se registró en el canal con 0.28 m.s^{-1} durante el vaciante para la condición de

mayor aporte de agua proveniente de los ríos con flujo constante y siempre en vaciante para la condición de flujo variable (Fig. 7). El incremento del flujo de los ríos eleva la velocidad media en los puntos seleccionados pero no se observan cambios en el patrón general de circulación de la bahía al nivel superficial, sólo un fortalecimiento del movimiento de las aguas en el sentido de dirección del canal de entrada.

En los tres puntos analizados así como la interpretación del los patrones de circulación a diferentes profundidades en tres transectos perpendiculares a los flujos principales del los ríos Damují Salado y al canal de entrada de la bahía revela la existencia en las zonas más profundas de velocidades muy pequeñas, de 0.03 m.s^{-1} , e incluso momentos de total reposo, (Fig. 8).

DISCUSIÓN

Para condiciones normales de viento, su influencia sobre la velocidad media superficial es menor que 0.5 %, en las estaciones seleccionadas. El viento eleva su importancia en aquellas zonas bajas donde el esfuerzo es capaz de mover la capa superficial en la dirección del mismo, por ejemplo

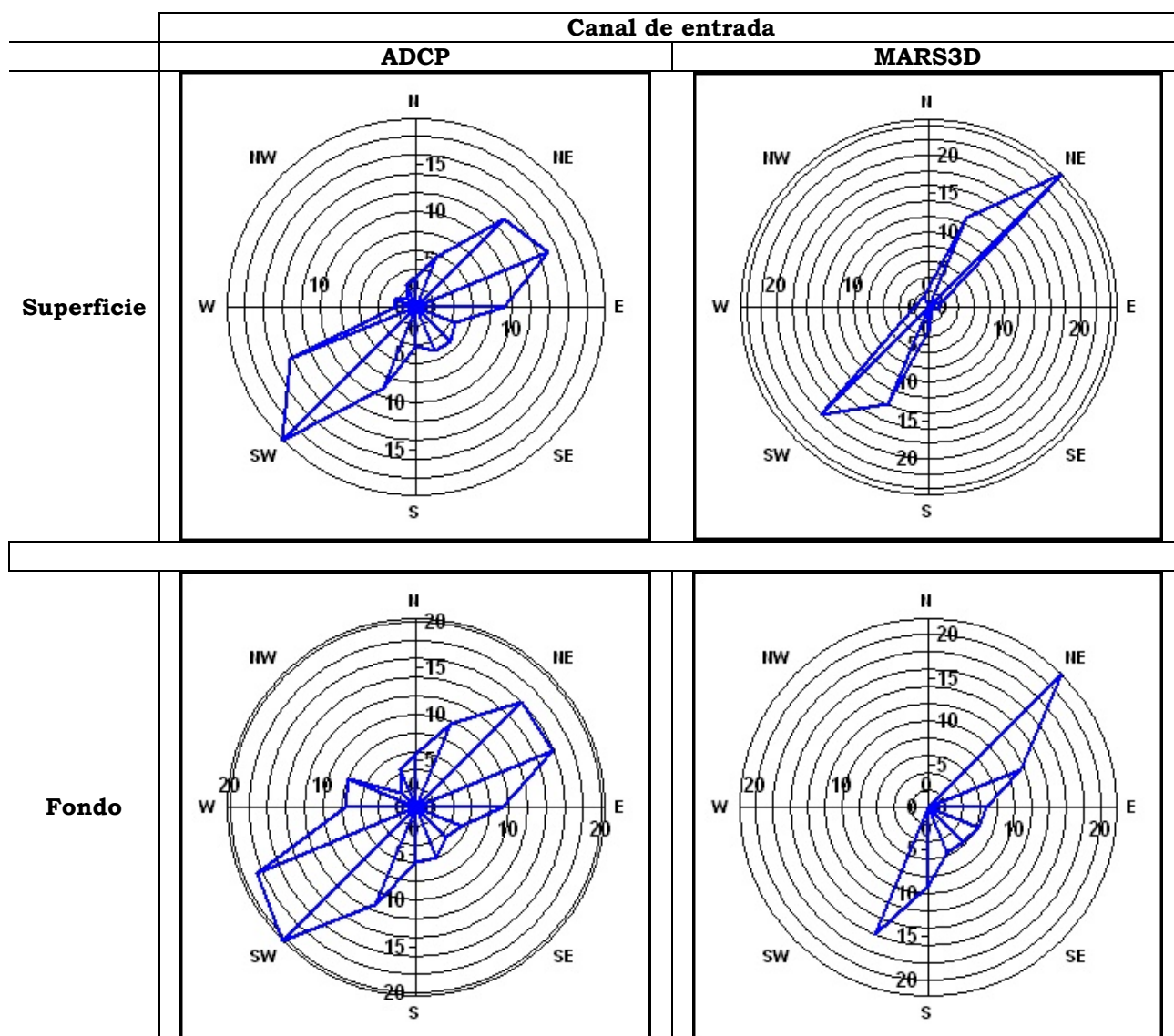


Fig. 6. Rosa de corrientes en la superficie y en el fondo en el canal de entrada de la Bahía de acuerdo a las mediciones directas con correntómetro ADCP y del modelo numérico MARS3D, no existen diferencias significativas entre ambas poblaciones maestres con significación de 0.05.

la desembocadura de los ríos Caunao y Damují. Para vientos de mayor intensidad ó permanentes se observa como la masa de agua es dirigida en el mismo sentido de dirección, fenómeno que puede ser de gran importancia para su análisis puramente físico antes, durante y después de la acción del viento, situación posible en el paso de huracanes por el área. Estos resultados corroboran el criterio popular de ser la bahía de Cienfuegos la capital de la náutica por su tranquilidad, característica que le posibilita la práctica de un grupo importante de deportes

náuticos que no requieren de una gran velocidad del viento.

En los tres puntos seleccionados se observa que el incremento del aporte fluvial genera igual efecto sobre la velocidad media y viceversa, sin embargo en términos de velocidad media es pequeño, cercano al 1 %, elevándose en la medida que nos acercamos a las desembocaduras de los ríos por el efecto lógico del impacto de su pluma. Sin embargo el análisis de este proceso debe estar acompañado en principio por la consideración de los flujos que

Tabla 2. Comportamiento de la velocidad superficial ($m.s^{-1}$) para diferentes flujos de entrada σ_r de los ríos que vierten a la bahía en los tres puntos seleccionados. a) se corresponde con C1 – canal de entrada, b) con C2 - lóbulo norte y c) con C3 – lóbulo sur.

	Factores	Número de registros	Media	Mínimo	Máximo	Std.Dev.
a)	Todos	2737	0.120122	0.000589	0.276500	0.064598
	3 σ_r	2737	0.121117	0.000000	0.280858	0.064928
	1/3 σ_r	2737	0.119918	0.000000	0.275282	0.064616
	Sin Viento	2737	0.120051	0.000000	0.276500	0.064624
	Factores	Número de registros	Media	Mínimo	Máximo	Std.Dev.
b)	Todos	2737	0.011436	0.005872	0.023352	0.004095
	3 σ_r	2737	0.013823	0.000000	0.026213	0.005584
	1/3 σ_r	2737	0.010211	0.000000	0.023214	0.004339
	Sin Viento	2737	0.011431	0.000000	0.023352	0.004100
	Factores	Número de registros	Media	Mínimo	Máximo	Std.Dev.
c)	Todos	2737	0.010809	0.002032	0.021633	0.004836
	3 σ_r	2737	0.016662	0.000000	0.025728	0.005133
	1/3 σ_r	2737	0.009084	0.000000	0.021715	0.005458
	Sin Viento	2737	0.010802	0.000000	0.021633	0.004838

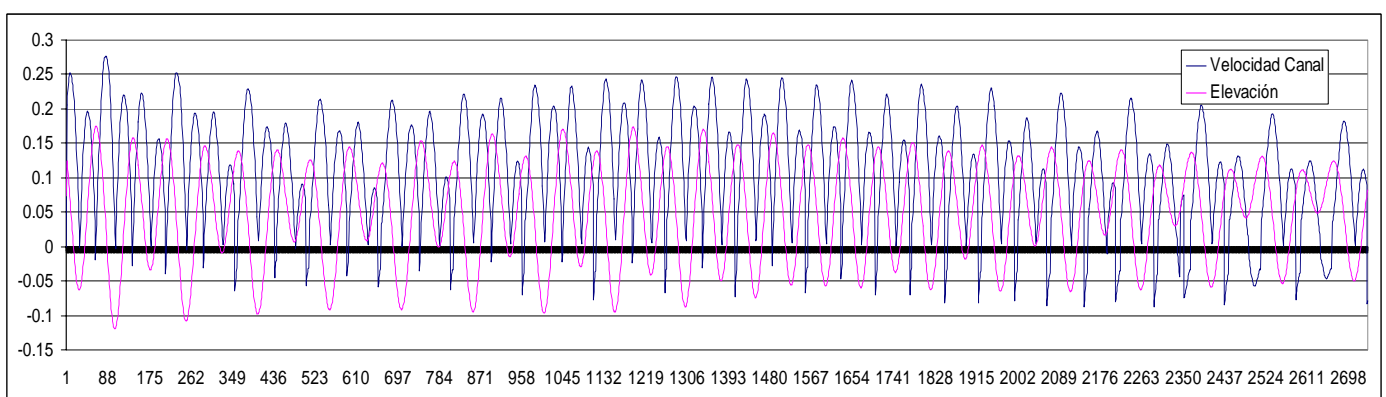


Fig. 7. Evolución de la elevación de la marea y la velocidad en el canal en un período de tres meses, obsérvese como la velocidad toma los mayores valores cuando se alcanza la mitad del vaciante.

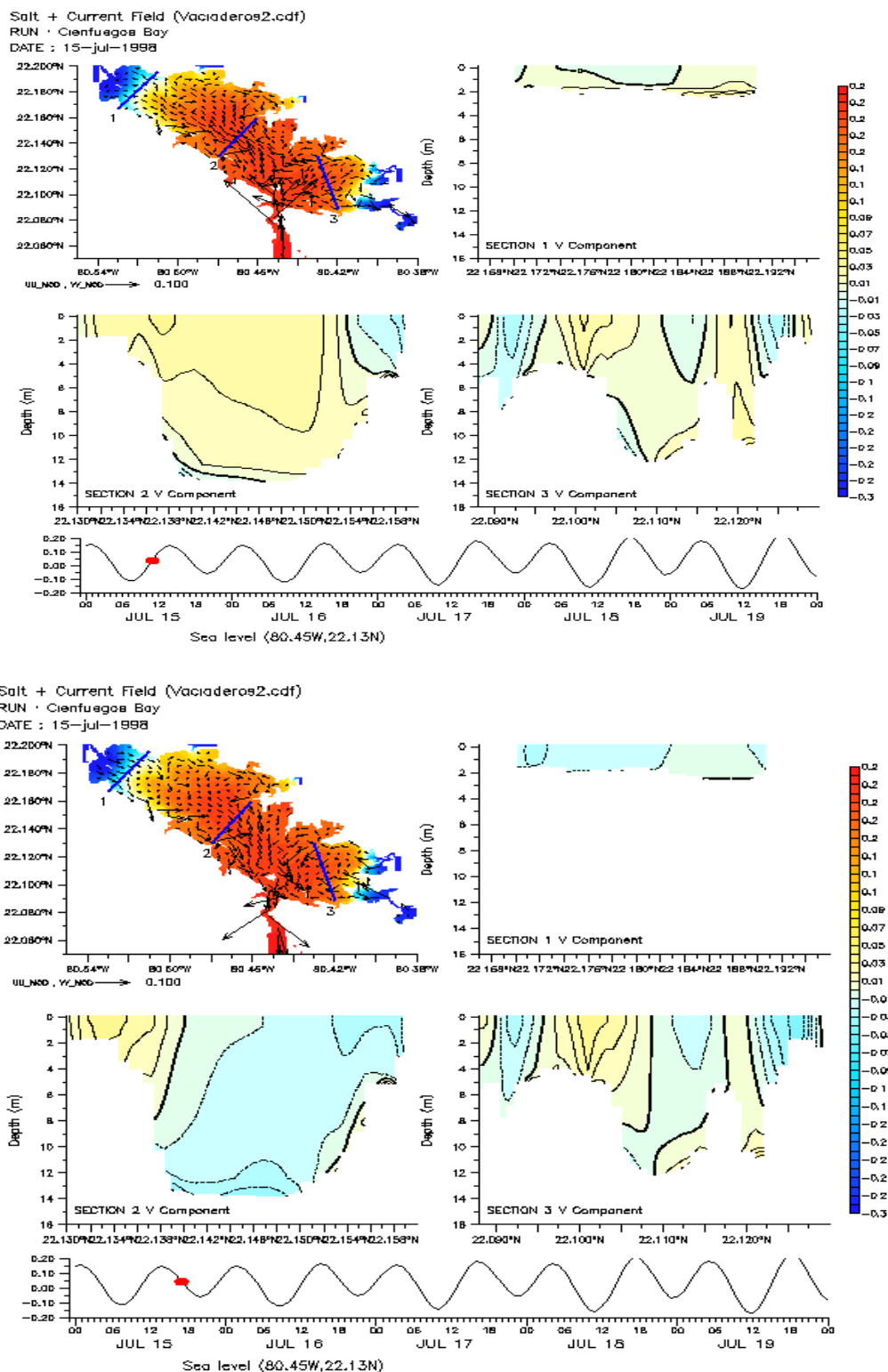


Fig. 8. Distribución superficial y vertical del componente de velocidad v durante el llenante y el vaciante en tres secciones perpendiculares a la dirección principal de los flujos de los ríos Damují y Salado y del canal de entrada de la bahía.

recibe la bahía por estos ríos y qué significan estos con relación al flujo que recibe como resultado del intercambio mareal con el Caribe. Mediciones realizadas en el canal de entrada indican que, durante el lapso de tiempo que abarca la fase de llenante se registraron volúmenes transportados por el canal entre $2.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ y $62 \times 10^6 \text{ m}^3$ para velocidades medias entre 0.25 m.s^{-1} y 0.63 m.s^{-1} respectivamente, en tanto en ese mismo período el aporte fluvial es $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Ochoa, 1977). Esto implica que no podemos esperar que para los flujos considerados se puedan establecer velocidades mayores o menores a la calculada. El intercambio de las aguas en la bahía de Cienfuegos es fundamentalmente como resultado de las mareas, el aporte fluvial eleva su importancia en la misma medida que eleva su magnitud con relación a los flujos que representa el intercambio mareal alcanzando hasta un 20 % de importancia en su aporte al movimiento de las aguas en condiciones de máxima aportación. Este fenómeno es observable durante la ocurrencia de eventos ciclónicos con grandes aportes de agua por lluvias, que arriban a la bahía por casi la totalidad de su línea de costa. Este análisis toma valor desde el punto de vista ecológico por cuanto, el aporte fluvial aún cuando sea pequeño es un mecanismo regulador del intercambio y por lo tanto del incremento o disminución de las concentraciones de nutrientes o contaminantes presentes y en igual medida del nivel de exposición, y las dosis recibidas por las comunidades que habitan este ecosistema.

Si consideramos la relación entre las dimensiones relativas de ambos lóbulos de la bahía de Cienfuegos y las velocidades en los puntos C2 y C3, con todos los factores en juego, puede plantearse que el lóbulo norte tiene mayor dinámica que el del sur. Esto tiene especial relevancia en el desarrollo ulterior del puerto de Cienfuegos dada la implicación que tiene en la evaluación de descargas accidentales o rutinarias sobre este ecosistema y el cálculo del tiempo de residencia de los contaminantes vertidos y la consiguiente exposición de la biota a los mismos.

La existencia de zonas profundas de la bahía en las cuales la velocidad de las corrientes es mínima puede explicar la existencia gran sedimentación de partículas finas, (Alonso *et al.*, 2006) y como estas se convierten en áreas favorables para la acumulación de nutrientes con singular interés para el mantenimiento de los procesos ecológicos en esta bahía.

CONCLUSIONES

El modelo MARS3D implementado para la bahía de Cienfuegos cuyos resultados se exponen en este trabajo reproduce el patrón de circulación y la variación de la marea con una confiabilidad del 99.5%.

La acción combinada de la marea, el viento y el aporte fluvial permite el movimiento de las aguas de la bahía de Cienfuegos. La evaluación de la importancia de cada uno de estos factores nos permite concluir que el intercambio está dado fundamentalmente por los flujos que entran y salen cada vez con las mareas y el aporte fluvial eleva su importancia en la misma medida que eleva su magnitud con relación a los flujos que representa el intercambio mareal, alcanzando hasta un 20 % de importancia en su aporte al movimiento. El viento como factor de fuerza en condiciones normales determina el 0.5 % del intercambio de las aguas de la bahía de Cienfuegos con el mar Caribe.

REFERENCIAS.

- Alonso H., C., M. Díaz A., A. Muñoz C., R. Delfanti, C. Papucci, O. Ferretti and C. Crovato (2006): Recent changes in sedimentation regime in Cienfuegos Bay, Cuba, as inferred from ^{210}Pb and ^{137}Cs vertical profiles. *Continental Shelf Research* 26:153-167.
- Anónimo (1978): Atlas de Cuba. Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía, 168 pp.
- Anónimo (1979): *Obras marítimas de descarga del petróleo y sus productos desde la refinería a construir en la ciudad de Cienfuegos*. Proyecto Técnico Ejecutivo, Investigaciones de Ingeniería e Hidrología, LENMORNIIPROECT, Leningrado.
- Anónimo (2005): Tablas de Marea de las Costas de Cuba. Servicio Hidrográfico y Geodésico de la República de Cuba. *EDIMAR Agencia de Cartografía Náutica*, 246 pp.
- Araujo, M. (1988): Variaciones estacionales del plancton en la Bahía de Cienfuegos. Cuba, Academia de Ciencias, Archivo Científico, Instituto de Oceanología, Cuba, 17 pp.
- Areces M., A. (1986): Bahía de Cienfuegos: Eutroficación y planeamiento ambiental. *Rep. Invest. Inst. Oceanología* 51:1-36.

- Blumberg, A.F. and G.L. Mellor (1987): A description of the three-dimensional coastal ocean circulation model. *In: Three-dimensional coastal ocean model: American Geophysical Union* (N.S. Heaps, ed.), Washington DC, 16 pp.
- Briantsev, V. e I. Machado (1970): Algunas particularidades del régimen hidrológico de la Bahía de Cienfuegos y la pesca del camarón. Cuba, Instituto Nacional de la Pesca, Centro de Investigaciones Pesqueras, *Contribución* No. 29, 22 pp.
- Deleersnijder, E. and J.M. Beckers (1992): On the use of the σ -coordinate system in regions of large bathymetric variations. *J. Mar. Sys.* 3:381-390.
- Deleersnijder, E., J. Wang and N.K. Moers (1998): A two compartment model for understanding the simulated three-dimensional circulation in Prince William Sound, Alaska. *Continental Shelf Research* 18:279-287.
- Douillet, P. (1998): Tidal dynamics of the south-west lagoon of New Caledonia: observations and 2D numerical modelling. *Oceanol. Acta* 21:69-79.
- Douillet, P., S. Ouillon and E. Codier (2001): A numerical model for fine suspended sediment transport in the southwest lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs* 20:361-372.
- Dyer, K.R. (1973). A Physical Introduction *In: Estuaries*. John Wiley and Sons, New York, 140 pp.
- Hearn, C.J. and P.E. Holloway (1990): A three dimensional barotropic model of the response of the Australian North West Shelf to tropical cyclones. *J. Phys. Oceanogr.* 20:60-80.
- Laodong, G., P.H. Santschi and K.W. Warnken (2000): Trace metal composition of colloidal organic material in marine environments. *Marine Chemistry* 70:257-275.
- Huret, M., F. Gohin, D. Delmas, M. Lunven and V. Garçon (2007): Use of SeaWiFS data for light availability and parameter estimation of a phytoplankton production model of the Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems* 65(1-4):509-531.
- Lazure, P. and J.C. Salomon (1991): Coupled 2-D and 3-D modelling of coastal hydrodynamics. *Oceanological Acta* 14(2):173-180.
- Lazure, P. and A.M. Jégou (1998): 3D modelling of seasonal evolution of Loire and Gironde plumes on Biscay bay continental shelf. *Oceanol. Acta* 21:165-177.
- Loyer, S. (2001): Modélisation de la production phytoplanctonique dans la zone côtière atlantique enrichie par les apports fluviaux. Ph.D Thesis, Paris 6 University, 232 p.
- Ochoa, S. (1977): Estudio de las corrientes en las bahías cubanas: Bahía de Cienfuegos. *Rev. Voluntad Hidráulica* 43:26-30.
- Monse, N. (2002): A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnol. Oceanogr.* 47(5):1545-1553.
- Messinger, F. and A. Arakawa (1976): Numerical methods used in atmospheric models. *GARP Publ. Ser.* 17, vol. I WMO, 64 pp.
- Nihoul, J.C.J. (1984): A three-dimensional general marine circulation model in a remote sensing perspective. *Ann. Geophys.* 2:433-442.
- Rey N., J. (2004): *La toma de decisiones en el manejo integrado de zonas costeras*. Cuba, Universidad de Cienfuegos, *Tesis de Maestría en Manejo Integrado de Zonas Costeras*, 65 pp.
- Ruddick, K.G., E. Deleersnijder, P.J. Luyten and J. Ozer (1995): Haline stratification in the Rhine-Meuse plume: a three-dimensional model sensitivity analysis. *Continental Shelf Research* 15:1597-1630.
- Seisdedo L., M. y A. Muñoz C. (2005): Efecto de las precipitaciones en la calidad de las aguas de la Bahía de Cienfuegos. *Rev. Cubana de Meteorología* 12(2):64-67.
- Santschi, P.H. (1995): Seasonal in Nutrient Concentrations in Galveston Bay. *Marine Environmental Research* 40(4):331-362.
- Tomzack, M. and C. García (1975): A numerical model of the circulation in Cienfuegos Bay, Cuba. *Estuarine Coast. Mar. Sci.* 3(4):391-412.
- Tur, A.I. y M. Becerra (1991): Evaluación de las principales cargas contaminantes de origen urbano-industrial vertidas directamente en la Bahía de Cienfuegos. *Revista Científico-Técnica I.I.T.* 11(3):8-10.
- Usagaua, Z. (1998): *Informe climatológico de los resultados de las observaciones de parámetros meteorológicos del emplazamiento de la Central Electronuclear Juraguá*. Informe de Seguridad e Impacto Ambiental. Rev. 00. T.3, Cap. 2.3.2, 92 pp.
- Villasol, A. (1991): Bahía de Cienfuegos y costas adyacentes, 1988-1990. Cuba, Academia de Ciencias, Ministerio del Transporte, Ministerio de la Industria Pesquera y Ministerio de Educación Superior. *Resumen de Investigaciones*.

Aceptado: 12 de febrero de 2008