

Análisis de los procesos de renovación de las aguas de la Bahía de Cienfuegos

Alain Muñoz-Caravaca, Agustín García-Rodríguez,* Pascal Douillet, Ovel Díaz-García, Renaud Fichez,** Roberto Herrera-Marrero y Javier Alcántara-Carrió.*****

Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Carretera Castillo de Jagua, kilómetro 1½, Cienfuegos, Cuba. *Facultad de Química y Farmacia, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Carretera de Camajuaní, Villa Clara, Cuba. **Instituto de Investigaciones para el Desarrollo de Francia, Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Hidrobiología, Av. San Rafael Atlixco No. 186 Colonia Vicentina, México D.F., México. ***Departamento Ciencias Básicas y Experimentales, Universidad Católica de Valencia, C/ Guillem de Castro, 94, 46003 Valencia, España.

Recibido: 1 de julio de 2011

Aceptado: 12 de septiembre de 2011

Palabras clave: estuarios, tiempo de residencia, Bahía de Cienfuegos, Mar Caribe, estacionalidad.
Key words: estuaries, flushing time, residence time, Cienfuegos bay, Caribbean Sea. Seasonality.

RESUMEN. Cómo intercambia sus aguas la Bahía de Cienfuegos con el Mar Caribe y cuáles factores determinan la velocidad de este proceso es un tema pobremente abordado. Determinar la distribución del tiempo de residencia de las aguas de la Bahía de Cienfuegos, considerando a este sistema natural como un reactor de mezcla continua, mediante la aplicación del modelo ideal de mezcla perfecta, fue el objetivo fundamental de este trabajo. Con la aplicación de métodos numéricos tridimensionales que simulan las características hidrodinámicas de la bahía, se evalúa la influencia del viento y los aportes fluviales sobre su capacidad de intercambio con el Mar Caribe. Se determinan tres características del proceso de renovación de las aguas: los tiempos de residencia de retardo y de residencia local. Las distribuciones espaciales de los tiempos de retardo y de residencia local, revelaron diferencias en la capacidad de autodepuración de los lóbulos norte y sur de la bahía, la existencia de zonas de lento movimiento, el carácter estacional de estas características y fuertes gradientes verticales del tiempo de residencia que en algunas zonas de la bahía superan los 10 d entre el fondo y la superficie. Se concluye que la Bahía de Cienfuegos es un sistema de lento intercambio con un tiempo de residencia que puede alcanzar hasta 60 d, por lo que resulta necesario y vital fortalecer acciones de gestión ambiental que reduzcan las cargas contaminantes que afectan este ecosistema.

ABSTRACT. How it exchanges their waters the Bay of Cienfuegos with the Caribbean Sea and which factors determine the speed of this process it is a poorly approached topic. To determine the distribution of the residence time of the Bay of Cienfuegos, considering this natural system as a continuous mixing tank reactor, applying the ideal model of perfect mixture, it is the main goal of this work. Through high-resolution numerical modeling technique, the role of tidal forcing, the freshwater inputs and the winds on the mass exchange processes of Cienfuegos Bay with Caribbean Sea are determined. Three characteristics of the renovation process of the waters are definite: the residence time, the flushing lag and the local residence time. The spatial distributions of flushing lag and of the local residence time revealed the differences in the self-cleaning capacity of both lobes of the bay, the existence of areas of slow movement, the seasonal character of these characteristics and strong vertical gradients of the residence time that overcome the 10 d between the bottom and the surface in some areas of the bay. It is concludes that the Bay of Cienfuegos is a system of slow exchange with residence time that reach up to 60 d, being vital the necessity to strengthen actions of environmental administration that reduce the polluting loads to this ecosystem.

INTRODUCCIÓN

El estudio de las capacidades de autodepuración de las bahías y otros ecosistemas costeros sometidos a la creciente presión humana es necesario cuando se necesita gestionar de manera sostenible estos recursos naturales. Esta característica de las bahías puede estimarse a partir del tiempo de residencia de sus aguas, variable esta que se ha considerado parte de las normativas para

la evaluación ambiental en algunos países como Estados Unidos, Portugal y México.^{1,2}

Para los ingenieros químicos resulta de vital importancia durante el diseño y escalado de equipos o la modelación de sistemas, el conocimiento de la distribución del tiempo de residencia (DTR) del fluido. La determinación de la DTR proporciona una técnica eficaz para diagnosticar y caracterizar el comportamiento hidrodinámico

Correspondencia:

M.C. Alain Muñoz Caravaca

Centro de Estudios Ambientales de Cienfuegos, Carretera Castillo de Jagua, kilómetro 1½, Cienfuegos, Cuba.

Correo electrónico: alain@ceac.cu

del fluido y de las reacciones químicas o biológicas que se llevan a cabo en los reactores o sistemas de reacción en estudio.³ El análisis de la DTR de un trazador dentro de un sistema controlado permite obtener el modelo de flujo que rige en él. Comúnmente, un modelo ideal del reactor de flujo de pistón para los Reactores Tubulares (Puff Flow Reactor) o un modelo de mezcla perfecta para los Reactores de Mezcla Continua (Continous Stirring Tank Reactor), o la combinación de estos con diferentes interrelaciones pueden describir el comportamiento de los reactores reales con gran precisión. Los modelos ideales en muchos casos, no son suficientes para describir adecuadamente muchas situaciones, cuando los volúmenes de los reactores son grandes o las mezclas son más viscosas. Varias modificaciones importantes en el modelo de flujo ideal surgen ante estas situaciones como: la formación de regiones estancadas o de lento movimiento dentro del reactor real, las cuales provocan regiones en cortocircuito, el reciclado de flujos internos o la existencia de zonas propiamente sin movimiento o muertas. También pueden usarse los métodos de DTR para desarrollar y validar modelos de flujo y aplicarse para presentar sistemas escalados desde el laboratorio a la industria.³

Considerar las bahías, los estuarios y otros ecosistemas naturales como reactores químicos permite establecer una analogía o determinar las desviaciones de este reactor respecto al tanque de mezcla ideal o de mezcla completa u otro modelo desarrollado para el estudio de la mezcla de reactantes. La aplicación de estos métodos a sistemas naturales ha tomado valor en muchas bahías y ríos del mundo como es el caso del Lago Óbidos en Portugal o de Nueva Caledonia.⁴⁻⁸ En Cuba sin embargo, este tipo de aplicación no ha sido desarrollada para sistemas naturales tales como las bahías y no existe reporte alguno acerca del tema.

Los estudios hidrodinámicos de la Bahía de Cienfuegos que se conocen son escasos y se han circunscrito a mencionar sus principales características hidrodinámicas sin determinar su influencia sobre la capacidad de renovación de sus aguas. Solo en tres ocasiones, se reporta el tiempo de residencia de la bahía considerando para ello, modelos físicos cuya aplicabilidad en este sistema resulta limitada.⁹⁻¹¹ Con el desarrollo computacional actual, se pueden aplicar métodos numéricos que permiten simular las características hidrodinámicas de los ecosistemas costeros y considerar los efectos de diferentes factores sobre el movimiento como los aportes fluviales, el viento, la radiación solar, las precipitaciones, entre otros, que antes solo podían ser abordados mediante modelos analíticos y por tanto, de manera mucho más limitada.¹²⁻¹⁷

A partir de la simulación hidrodinámica desarrollada por los autores en un estudio previo, este trabajo tuvo como objetivo exponer los resultados alcanzados en la determinación de la distribución de los tiempos de residencia, de retardo y de residencia local para la Bahía de Cienfuegos tomando como aproximación la función de distribución correspondiente al reactor continuo de mezcla completa y considerando como factores de fuerza al viento y los aportes fluviales.¹⁸

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

La Bahía de Cienfuegos posee un área de 88 km² y un volumen total de 90 Mm³. 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 "La Cueva" que tiene una profundidad promedio de 1,5 m, el cual ejerce gran influencia en la circulación de las masas de agua dentro de la bahía. 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 (Fig. 1).¹⁸



Fig. 1. Localización de la Bahía de Cienfuegos, Cuba.

La marea es predominantemente semidiurna con una variación media anual de 0,27 m, lo cual constituye el mecanismo fundamental de intercambio con el mar Caribe. El aporte fluvial es otro factor que regula el movimiento de las aguas en este ecosistema. Cuatro ríos vierten sus aguas en la Bahía de Cienfuegos: el Caunao, el Arimao, el Damuji y el Salado. Damuji y Caunao vierten al lóbulo norte y sur respectivamente y modulan las características hidrodinámicas de la bahía en la medida que incrementan sus aportes de agua dulce.¹⁹ Estos aportes se corresponden, como en el resto del país, con las variaciones estacionales propias del clima tropical, caracterizado por la presencia de dos estaciones climáticas bien definidas, un período poco lluvioso entre noviembre y abril, con un promedio de lluvias entre 1994 y 2001 de 59,6 mm y otro período lluvioso, en el resto de los meses con un promedio de precipitaciones cuatro veces superior al anterior (217,6 mm).²⁰

Modelo numérico

El modelo numérico empleado se denomina MARS3D, desarrollado por la División de Medio Ambiente y Planificación Costera del Instituto Francés de Investigaciones del Mar (IFREMER), para aplicaciones en ambientes estuarinos, bahías y embalses.^{20,22} MARS3D ha sido aplicado en otras configuraciones acoplado a modelos biogeoquímicos en el Golfo de Vizcaya y en el lago de Nueva Caledonia, en el Pacífico tropical.²¹⁻²⁵ La implementación de este modelo para la Bahía de Cienfuegos consideró como factores fundamentales del movimiento de las aguas a la marea, el viento y los

aportes fluviales. Este modelo hidrodinámico se validó para la señal de marea con menos del 1 % de error medio y un índice de acuerdo del 91 % para la velocidad de las corrientes medidas en 5 estaciones en el interior de la bahía. Una descripción más detallada de este proceso, la calibración, validación e importancia de cada variable sobre las características hidrodinámicas de la Bahía de Cienfuegos se aportan en un trabajo anterior.¹⁹

Determinación de la distribución del tiempo de residencia

A partir del modelo hidrodinámico debidamente validado y para calcular el tiempo de residencia se consideró a la Bahía de Cienfuegos integralmente como un solo reactor, de modo que expresara el carácter general del proceso de autodepuración en todo el ecosistema. Del análisis de la DTR pudo derivarse la interpretación de criterios a escala local que permitieran definir la distribución del tiempo de residencia local y el tiempo de retardo, a partir del cual se recibe la señal de estímulo del trazador. El tiempo de retardo es el que transcurre desde que el trazador se inyecta al sistema hasta el inicio del decaimiento de su concentración. El tiempo de residencia local, resulta de aplicar el concepto de tiempo de residencia a cada celda del dominio de trabajo, lo que permite conocer cómo la variabilidad de las características hidrodinámicas en la celda influyen sobre el tiempo de residencia. Por lo tanto, esta medida es explícitamente dependiente del tiempo y de la posición inicial, es una característica inherente a la parcela en estudio.²⁶⁻³⁷

Para calcular el tiempo de residencia inicialmente se consideró una concentración inicial C_0 ($C_0 = 1$) de un trazador pasivo no sedimentable en cada celda de todo el dominio de cálculo. Las celdas fuera del dominio de trabajo tuvieron una concentración inicial C_0 ($C_0 = 0$). La evolución de la concentración en cada celda bajo la influencia de las condiciones hidrodinámicas muestra la evolución de un frente que al alcanzar el 95 % de la concentración inicial determina el tiempo de retardo. A partir de este nivel, se asume el inicio del decaimiento de la concentración del trazador en la celda. El tiempo de residencia local se determina por una regresión exponencial simple de la curva de concentración contra tiempo en cada celda. Este procedimiento es el mismo que se utiliza para determinar el tiempo de residencia para toda la bahía solo que el volumen es referido a todo el ecosistema.

Dadas las características climáticas e hidrológicas que determinan la circulación de la Bahía de Cienfuegos y con el objetivo de evaluar la variabilidad del tiempo de residencia, en este trabajo se consideró tres régimenes hidrológicos, representados por los períodos: SECO, MEDIO y HÚMEDO; así como de tres direcciones predominantes de los vientos: noreste, sureste y suroeste. Aunque las características climáticas propias respondieron a dos períodos SECO y HÚMEDO o lluvioso, se consideró un régimen hidrológico MEDIO, en el que los aportes fluviales se correspondieron con su media histórica.¹⁹ Por razones de espacio, solo se muestran las gráficas que se corresponden con el aporte fluvial medio y todas las direcciones de viento aunque se discuten los nueve casos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tiempo de residencia

El tiempo de residencia de la Bahía de Cienfuegos varía en función de los aportes fluviales, creciendo en la medida que disminuyen para iguales condiciones de

vientos. Para todos los casos analizados, el valor mínimo fue de 39,60 d y se alcanzó para régimen HÚMEDO y vientos del noreste. Para vientos del sureste y mínimo aporte fluvial, el tiempo de residencia alcanzó su mayor valor de 59,67 d, (Tabla 1).

Los vientos del sureste (SE) y el suroeste (SW) provocan un retardo de la residencia de las aguas desarrollando un efecto "tapón" en el canal que limita la salida de las aguas desde el interior de la bahía. Pudo observarse que el proceso de intercambio de las aguas de la Bahía de Cienfuegos con el mar Caribe es lento, lo cual tiene naturalmente un impacto sobre la calidad de la vida en este ecosistema y las acciones de gestión ambiental necesarias para lograr un adecuado desempeño socioeconómico.

Tiempo de retardo

El tiempo de retardo mostró una gran variabilidad espacial en función de los aportes fluviales, la dirección del viento y la profundidad de la columna de agua (Fig. 2). Se pudieron definir en función de su distribución espacial, tres áreas en la bahía: todo el lóbulo sur, una región central entre los lóbulos sur y norte y la parte norte de este lóbulo norte.

Para vientos del noreste (NE), al nivel superficial y para régimen MEDIO y HÚMEDO se observó una gran diferencia en el comportamiento de los lóbulos norte y sur. En el lóbulo sur se alcanzaron tiempos de retardo menores de 4 d mientras que para la región central fueron entre 9 y 15 d, siendo significativo por su valor ambiental, el sector costero de la ciudad de Cienfuegos.

Para el nivel de fondo, el lóbulo sur también difirió del comportamiento del lóbulo norte, el cual fue notablemente lento al alcanzar tiempos de retardo de hasta 24 d considerando aportes fluviales en régimen MEDIO. Se destacó todo el frente del río Damují, en el sector noroccidental, por su valor en relación con las operaciones marítimas y de transportación de petróleo y sus derivados y de todas las cargas derivadas de las operaciones en el resto de la zona portuaria que pueden llegar hasta esta región con el movimiento de las corrientes en el lóbulo norte de la bahía.

Cuando disminuyen las aportaciones fluviales a un régimen hídrico SECO, la región central de la bahía crece más hacia el norte y noreste respecto al caso MEDIO y también el valor del tiempo de retardo alcanza entre 20 y 24 d.

Al nivel de fondo, al disminuir los aportes fluviales se apreció una disminución del tiempo de retardo con valores máximos de 15 d. Este fenómeno puede explicarse por la estratificación y las características morfológicas de la Bahía de Cienfuegos, en lo cual se destaca el estrecho canal y la presencia del bajo "La Cueva", que divide ambos lóbulos. Esta condición geográfica provoca que el agua en el lóbulo norte al tratar de salir encuentre una barrera física en el bajo y una única salida por el canal, obligando a las aguas más profundas a permanecer mucho más tiempo que las superficiales que logran rebasar este accidente.

Tabla 1. Tiempo de residencia de la Bahía de Cienfuegos.

Aporte fluvial	Dirección del viento		
	NE	SE	SW
	Tiempo de residencia (d)		
Seco	50,17	59,67	59,46
Medio	44,60	51,04	51,13
Húmedo	39,60	43,14	45,31

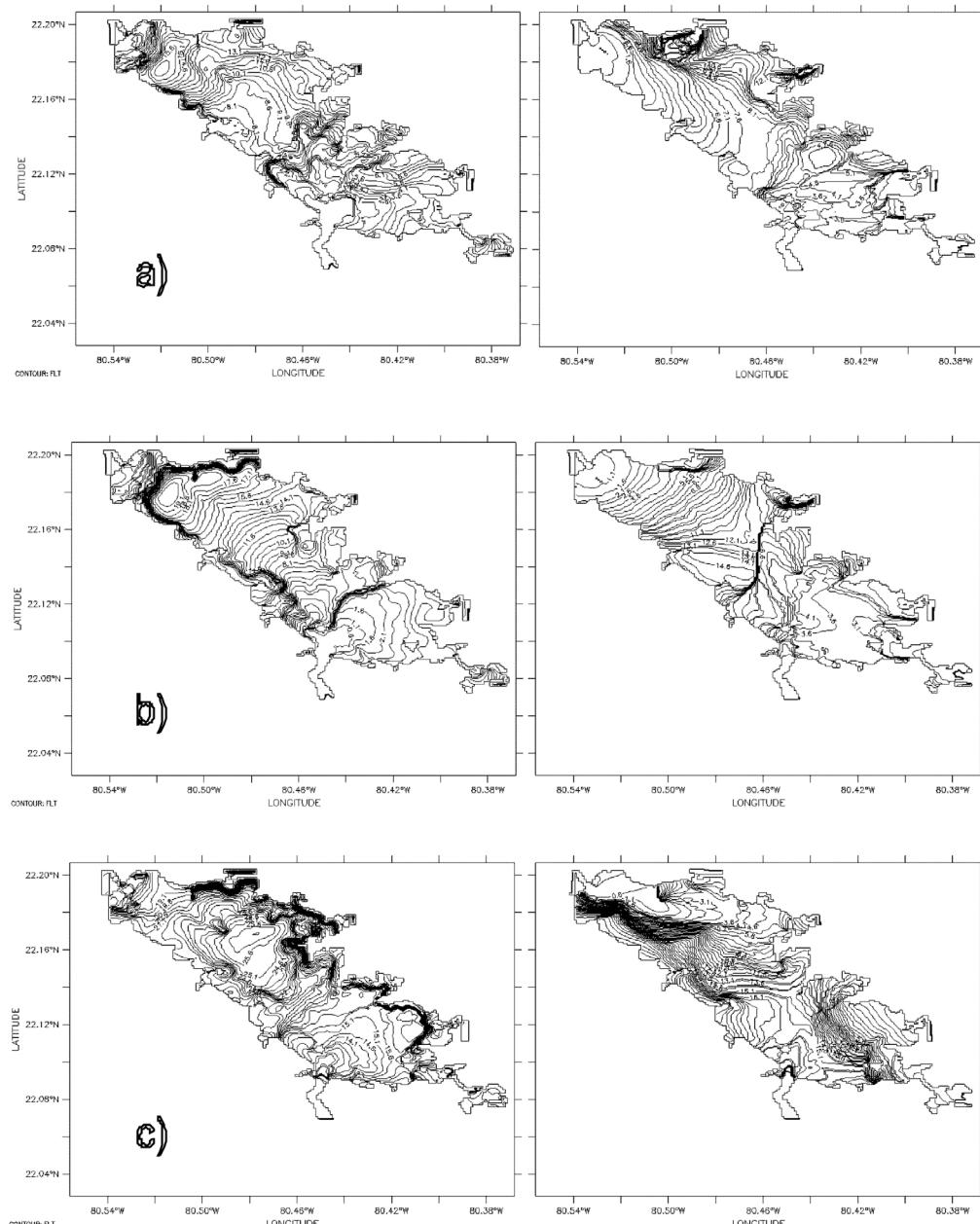


Fig. 2. Distribución espacial del tiempo de retardo para condiciones medias del aporte fluvial y tres direcciones del viento en las capas superficiales (derecha) y fondo (izquierda). a) Noreste. b) Sureste. c) Suroeste.

Cuando los vientos soplan del sureste, con régimen hídrico MEDIO y al nivel superficial la pluma del río Damují queda retenida en zona norte y se define claramente una zona central donde el tiempo de retardo alcanza entre 10 y 15 d. En estas condiciones, el lóbulo sur mantiene tiempos de retardo menores que no superan los 5 d.

Al nivel de fondo, el efecto tapón que se genera por la acción del viento incrementa notablemente el tiempo de retardo en todo el lóbulo norte, en particular, todo el sector noroeste entre la desembocadura del río Salado y la costa occidental de este lóbulo.

Cuando sopla el viento del SW, se observa cómo la pluma del río Damují se presiona contra la costa norte alcanzando valores mínimos del tiempo de retardo mientras que en el sector costero occidental se alcanzan valores de hasta 24 d al oeste de la desembocadura del Damují. Al nivel de fondo entre Punta Arenas y Punta La Sierpe, se establece un área con tiempos de retardo mayores de 20 d.

Al disminuir los aportes, en un escenario de régimen SECO y siempre con vientos del SW desde la desembocadura del Damují a la Ensenada de Calicito, se establece un área con tiempo de retardo mayor de 20 d y al nivel de fondo prácticamente todo el lóbulo norte está comprometido con valores de hasta 20 d.

Tiempo de residencia local

La distribución del tiempo de residencia local mostró mayor homogeneidad que el tiempo de retardo en toda la bahía (Fig. 3). En todos los casos analizados, se observó que esta escala temporal toma los valores mayores de 25 d. Para el régimen hídrico MEDIO y HÚMEDO la bahía intercambia mejor que en el SECO, pero el lóbulo norte continúa siendo el sector más comprometido en el ecosistema. Así, entre la Punta Calicito y hacia el norte de la bahía, el tiempo de residencia local alcanzó valores de hasta 56 d en el período seco y de 25 d en el régimen húmedo. El efecto del viento encima de la circulación, también es especialmente visible durante el período seco.

Para el caso de un viento noreste, la estratificación más grande se observa durante el período SECO. La diferencia entre la superficie y el fondo alcanza valores de 6 d en el lóbulo norte y casi 15 d en el sur. Para el período MEDIO y HUMEDO la estratificación es reducida y alcanza valores menores de 5 d.

En el caso de vientos del sureste o del suroeste, el tiempo de residencia local toma valores mayores que para los vientos del noreste bajo las mismas condiciones de aporte fluvial, refrendando la lenta capacidad del intercambio de la bahía. En estas condiciones, se observa un incremento del tiempo de residencia local al norte de Cayo Carenas y hacia la ciudad de Cienfuegos, dado el efecto de sombra hidrodinámica que genera el propio cayo que unido al bajo "La Cueva" resta velocidad a las aguas después de su paso por el canal de entrada.

CONCLUSIONES

La determinación de la DTR de la Bahía de Cienfuegos permite interpretar con mayor seguridad la problemática de la capacidad de autodepuración y la definición de las zonas más sensibles a la contaminación provocada por la descarga de fuentes directas.

La Bahía de Cienfuegos es un ecosistema de lento intercambio dado el lento período de autodepuración. Sus tiempos de residencia son elevados, especialmente, en el lóbulo norte de hasta 60 d, influenciado además, por la barrera natural que representa el bajo "La Cueva" y su mayor volumen, mientras que en el lóbulo sur solo se requieren 6 d por sus cercanías al canal y menor volumen.

A través del modelo hidrodinámico aplicado se ha podido determinar que, la gran estratificación de las aguas dada la influencia fluvial en la Bahía de Cienfue-

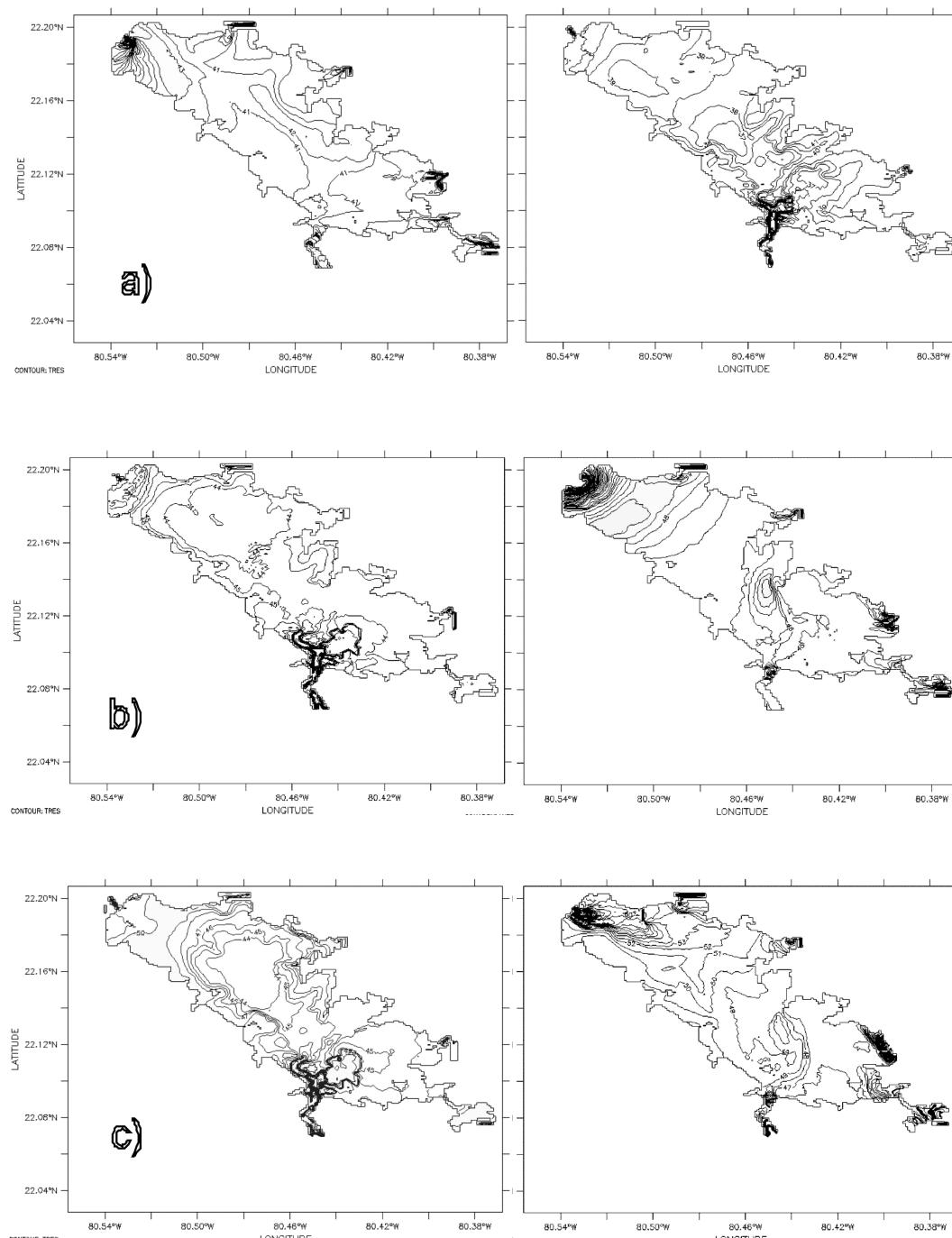


Fig. 3. Distribución espacial del tiempo de residencia local en la Bahía de Cienfuegos para condiciones medias del aporte fluvial y tres direcciones del viento en las capas superficiales (derecha) y fondo (izquierda). a) Noreste. b) Sureste. c) Suroeste.

gos determina los procesos de intercambio en este ecosistema. Las capas superficiales tienen mayor velocidad de intercambio que las del fondo, en el lóbulo norte se alcanzan diferencias de hasta 10 d entre la superficie y el fondo para el tiempo de retardo. Para el tiempo de residencia local, sin embargo, se alcanzan hasta 15 d de diferencia entre los niveles superficiales y de fondo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. De la Lanza-Espino G, Rodríguez I, Czitrom S. Water quality of a port in NW Mexico and its rehabilitation with swell energy. *Marine Pollution Bulletin*. 2010;60(1):123-130.
2. Ferreira JG. Development of an estuarine quality index based on key physical and biogeochemical features. *Ocean and Coastal Management*. 2000;43(1):99-122.
3. Levenspiel O. Chemical reaction engineering. New York: John Wiley and Sons: 1972.
4. Luketina, D. Simple Tidal Prism Models Revisited. *Estuarine and Coastal Shelf Science*. 1998;46:77-84.
5. Monse. A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport time scales. *Limnol Oceanogr*. 2002;47(5):1545-1553.
6. Rueda F, Moreno-Ostos E, Armengol J. The residence time of river water in reservoirs. *Ecological Modelling*. 2006;191:260-274.
7. Jouon A, Douillet P, Ouillon S, Fraunie P. Calculations of hydrodynamic time parameters in a semi-opened coastal zone using a 3D hydrodynamic model. *Continental Shelf Research*. 2006;26(12-13):1395-1415.
8. Oliveira A, Fortunato A, Regob J. Effect of morphological changes on the hydrodynamics and flushing properties of the O'ibidos lagoon (Portugal). *Continental Shelf Research*. 2006;26:917-942.
9. Tomzack M, García C. A numerical model of the circulation in Cienfuegos Bay, Cuba. *Estuarine Coastal Marine Science*. 1975;3(4):391-412.
10. Ochoa S. Estudio de las corrientes en las bahías cubanas: Bahía de Cienfuegos. *Revista Voluntad Hidráulica*. 1977;43:26-30.
11. Villasol A. Bahía de Cienfuegos y costas adyacentes, 1988-1990. Cuba Academia de Ciencias de Cuba, Ministerio del Transporte, Ministerio de la Industria Pesquera y Ministerio de Educación Superior. Resumen de Investigaciones. 1991.
12. Geyer W. Influence of Wind on Dynamics and Flushing of Shallow Estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 1997;44:713-722.
13. Geyer W, Morris J, Pahl F, Jay D. Interaction between physical processes and ecosystem structure: a comparative approach. En J. E. Hobbie (Ed.), *Estuarine science: a synthetic approach to research and practice*. Washington, DC: Island Press: 2000.
14. Gómez-Gesteira M, de Castro M, Prego R. Dependence of the water residence time in Ria of Pontevedra (NW Spain) on the seawater inflow and the river discharge. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 2003;58:567-573.
15. Kraines SB, Yanagi T, Isobe M, Komiyama H. Wind wave driven circulation on the coral reef at Bora Bay, Miyako Island. *Coral Reefs*. 1998;17:133-143.
16. Kraines SB, Suzuki A, Yanagi T, Isobe M, Guo X, Komiyama H. Rapid water exchange between the lagoon and the open ocean at Majuro Atoll due to wind, waves and tide. *Journal of Geophysical Research*. 1999;104:634-653.
17. Kraines SB, Isobe M, Komiyama H. Seasonal variations in the exchange of water and water-borne particles at Majuro Atoll, the Republic of the Marshall Island. *Coral Reefs*. 2001;20:330-340.
18. Instituto Cubano de Goedescia y Cartografía. *Atlas de Cuba*. 1978:p.168.
19. Muñoz Caravaca A, Douillet P, Díaz García O, Ouillon S, Ficchez R. Influencia de la marea, el viento y el aporte fluvial en la circulación de las aguas de la Bahía de Cienfuegos, Cuba. *Revista Investigaciones Marinas*. 2008;29(2):101-112.
20. Seisdedo M, Muñoz Caravaca A. Efecto de las precipitaciones en la calidad de las aguas de la Bahía de Cienfuegos. *Revista Cubana de Meteorología*. 2005;12(2):64-67.
21. Lazure P, Dumas F. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model at regional scale (MARS). *Advance Water Resource*. 2008;31(2):233-250.
22. Lazure P, Dumas F, Vrignaud C. Circulation on the armorican shelf (Bay of Biscay) in autumn. *Journal of Marine System*. 2008;72(1-4):218-237.
23. Velo-Suárez L, Reguera B, González Gil S, Lunven M, Lazure P, Nézan E, Gentien P. Application of a 3D Lagrangian model to explain the decline of a *Dinophysis acuminata* bloom in the Bay of Biscay. *Journal of Marine Systems*. 2010;(doi: 10.1016/j.jmarsys.2010.05.011)
24. Douillet P. Tidal dynamics of the south-west lagoon of New Caledonia: observations and 2D numerical modelling. *Oceanological Acta*. 1998;21:69-79.
25. Douillet P, Ouillon S, Codier E. 2001. A numerical model for the suspended sediment transport in the southwest lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs*. 2001;20:361-372.
26. Takeoka H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea. *Continental Shelf Research*. 1984;3:311-326.
27. Tartinville B, Deleersnijder E, Rancher J. The water residence time in the Mururoa atoll lagoon: sensitivity analysis of a three-dimensional model. *Coral Reefs*. 1997;16:193-203.
28. Rasmussen B, Josefson AB. Consistent estimates for the residence time of micro-tidal estuaries. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 2001;54:65-73.
29. Abdelrhman, M.A. Simplified modeling of flushing and residence times in 42 embayments in New England, USA, with special attention to Greenwich Bay, Rhode Island. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2005;62(1-2):339-351.
30. Lipizer M, Cossarini G, Falconi C, Solidoro C, Fonda-Umani S. Impact of different forcing factors on N:P balance in a semi-enclosed bay: The Gulf of Trieste (North Adriatic Sea). *Continental Shelf Research*. 2011;(doi:10.1016/j.csr.2011.06.004 (en prensa).
31. Huang, A, Rao YR, Lu Y, Zhao J. Hydrodynamic modeling of Lake Ontario: An intercomparison of three models. *Journal of Geophysical Research*. 2010;115:C12076, doi:10.1029/2010JC006269.
32. Azevedo I, Bordalo A, Duarte P. Influence of river discharge patterns on the hydrodynamics and potential contaminant dispersion in the Douro estuary (Portugal). *Water Research*. 2010;44:3133-3146.
33. Carrillo L, Palacios-Hernández E, Yesca M, Ramírez-Mangual AM. Spatial and Seasonal Patterns of Salinity in a Large and Shallow Tropical Estuary of the Western Caribbean Estuaries and Coasts. 2009;32:906-916.
34. Grifoll M, Del-Campo A, Espino M, Mader J, González, M, Borja A. Water renewal and risk assessment of water pollution in semi-enclosed domains: Application to Bilbao Harbour (Bay of Biscay). *Journal of Marine Systems*. 2011;(doi: 10.1016/j.jmarsys.2011.07.010
35. Jin-Hee Y, Shin-ichi A. Effect of Wind and Rainfall on Water Exchange in a Stratified Estuary Estuaries and Coasts. 2009;32:88-99.
36. Horst G, Edmunds P. Spatio-temporal variation in seawater characteristics in a semi-enclosed bay in St. John, U.S. Virgin Islands. *Caribbean Journal of Science*. 2010;46(1):54-63.
37. Rochelle AN, Wood TM, Bales JD. Use of a Two-Dimensional Hydrodynamic Model to Evaluate Extreme Flooding and Transport of Dissolved Solids through Devils Lake and Stump Lake, North Dakota, 2006. Consultado en: <http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5035/>.