

Simulación numérica de las corrientes marinas en el archipiélago Sabana-Camagüey

Numerical simulation of marine currents in Sabana-Camagüey Archipelago

Cleofé Álvarez Valladares*, Johan Navarro Padrón* y Luis Sorinas Morales*

*Instituto de Ciencias del Mar. Ave. 1ra No.18406 entre 184 y 186, Reparto Flores, Playa, Cuba.
cleo.alvalladares@gmail.com , cleofe@cebimar.cu

RESUMEN

Debido al creciente desarrollo de los diferentes sectores industriales en el archipiélago de Sabana-Camagüey es necesario un grado mayor de especificidad en la descripción de las corrientes marinas y la dinámica costera para esta zona, lo cual condujo a desarrollar esta investigación. Con este objetivo, se utilizó el modelo numérico regional ROMS_AGRIF (*Adaptive Grid Refinement in Fortran*), el cual es una versión del modelo ROMS (*Regional Ocean Model System*), con el objetivo de simular las corrientes marinas considerando el efecto de la marea astronómica en la zona del archipiélago Sabana-Camagüey. Como resultados, se asimiló correctamente el modelo hidrodinámico ROMS_AGRIF para la zona de estudio, obteniéndose una implementación válida del comportamiento de las corrientes marinas para toda el área del archipiélago Sabana Camagüey. Se seleccionó una configuración adecuada para el cálculo de la marea mediante 10 constituyentes fundamentales, aunque es posible mejorarla incluyendo los armónicos de bajo fondo y se obtuvieron buenos resultados en las simulaciones con un error de menos del 30 % de valores medidos, concordando así con las mediciones directas en el área de estudio.

ABSTRACT

The increasing development of different industrial sectors in Sabana-Camagüey Archipelago has demanded a greater degree of specificity in the description of marine currents and coastal dynamics for this zone, which led to developing this investigation. For the aforementioned purpose, the numerical regional model ROMS_AGRIF (*Adaptive Grid Refinement in Fortran*), a version of the model ROMS (*Regional Ocean Model System*), was used for simulating marine currents, considering the effect of astronomical tides in Sabana-Camagüey Archipelago. As a result, the hydrodynamic model ROMS was accurately assimilated, achieving a good performance. A valid implementation of the behavior of marine currents for Sabana-Camagüey Archipelago area was obtained through this model. An adequate configuration for computing tides was selected, based on 10 fundamental constituents; although it could be improved by including near-bottom harmonics. Good results were achieved regarding marine current simulations, since for most of the computed values, the error represented less than 30% of the measured values, being in accordance with punctual measurements in the study area.

Palabras clave: Corrientes marinas, marea, simulación numérica, modelación.

Keywords: Marine currents, tide, numerical simulation, modeling.

INTRODUCCIÓN

El estudio de las corrientes marinas es de gran importancia no solo para investigaciones marinas, sino también en el desarrollo de diferentes sectores económicos. La implementación de modelos numéricos en zonas costeras para la simulación de corrientes marinas, se ha convertido en un trabajo ineludible, ya que posibilita un conocimiento cuantitativo y cualitativo de las diversas características físicas y dinámicas de dichas zonas, ya que las corrientes marinas son responsables del intercambio de materia y energía de zonas costeras y océanos.

Para una adecuada simulación numérica de las corrientes marinas en la zona de estudio fue necesario el uso del modelo dinámico ROMS_AGRIF, que está en funcionamiento en el Instituto de Oceanología. Este modelo es quizás, uno de los más utilizados por la comunidad internacional en estudios de circulación marina, empleándose en simulaciones de escala global y hasta locales.

Numerosos investigadores han utilizado el modelo ROMS con el objetivo de estudiar el océano. Entre ellos se encuentran Escobar (2012), que validó del modelo numérico ROMS en la región ecuatorial comprendida entre la costa ecuatoriana y las Islas Galápagos, y Penven *et al.* (2006), quienes evaluaron el modelo ROMS con una técnica *1-way embedding* para la simulación del Sistema de Afloramiento en la región central de California.

Aunque en nuestro país existen diversos estudios sobre el tema en cuestión, aún existe un limitado conocimiento predictivo de las corrientes marinas en zonas del archipiélago Sabana-Camagüey, debido a que actualmente no contempla la acción de la marea y, por lo tanto, no es totalmente representativa de la dinámica asociada a ella. El presente trabajo tiene como objetivo simular las corrientes marinas en zonas del archipiélago de Sabana-Camagüey, teniendo en cuenta el efecto de la marea, mediante el modelo regional ROMS_AGRIF.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

El archipiélago Sabana-Camagüey, también conocido como Jardines del Rey, se extiende desde la península de Hicacos hasta la bahía de Nuevitás a lo largo de 465 km. Este abarca un gran número de cayos e islas en la costa norte de Cuba (Figura 1).

En total abarca un área de 75000 km^2 . Limita al sur con la costa centro septentrional de Cuba y al norte con la isobata de 10 metros. La plataforma marina que lo forma ocupa un total de 3400 km^2 , donde existen aproximadamente 2517 cayos e islas (3414 kkm^2). (Proyecto Sabana-Camagüey, 2014).

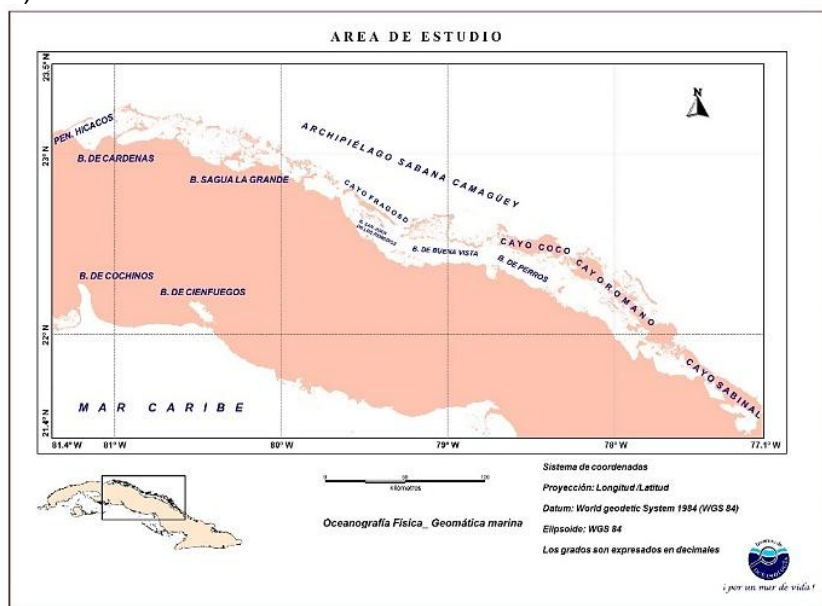


Figura 1. Área de estudio.

Figure 1. Study area.

Modelo Hidrodinámico ROMS_AGRIF

Se utilizó el modelo numérico ROMS_AGRIF (*Adaptive Grid Refinement in Fortran*) el cual es una versión del modelo ROMS (*Regional Ocean Model System*) (Shchepetkin & McWilliams, 2005), que ha sido desarrollado por el *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD) de Francia, en colaboración con la Universidad de California, Los Ángeles, EE.UU. En particular este modelo se ha utilizado con éxito para el estudio de la dinámica de zonas de surgencia de Perú

(Penven *et al.*, 2006). La subrutina AGRIF permite incluir las características de una malla refinada dentro del modelo numérico de diferencias finitas. El proceso de anidamiento es implementado para preservar la eficiencia del modelo ROMS sobre los cálculos simultáneos. Ambas grillas intercambian información a través de las fronteras laterales de la rejilla fina. El modelo ha sido usado exitosamente en estudios de calidad acuática y modelado de la circulación marina y descargas hipotéticas en la Bahía del Callao (Correa, 2008).

Herramientas de ROOMSTOOLS

ROOMSTOOLS es un conjunto de bases de datos globales y programas de Matlab integrados en un único paquete que permite generar los diferentes parámetros de entrada que precisa el modelo ROMS (mallas verticales y horizontales, topografía del fondo, forzamientos en la superficie y condiciones iniciales y de contorno).

En el modelo se editaron cinco archivos importantes para el pre y post procesamiento

En el pre-procesamiento se edita, el archivo *romstools_param*, donde se determina la configuración de los parámetros necesarios para las simulaciones en un dominio.

El nombre que se le dio a la simulación fue *Sabana_Camagüey* para un área mayor a la del estudio, con ello se evita que los errores de estabilización del modelo en las fronteras estén incluidos en el dominio de interés.

La resolución del modelo para el primer y segundo caso de estudio fue de 1 y 3 km respectivamente para la construcción de las coordenadas horizontales, y de 32 y 10 niveles de profundidad para las coordenadas verticales sigma con estrechamiento.

Los parámetros para la grilla vertical fueron: *theta_s=8* y *theta_b=0*, es decir con mayor resolución en los niveles cercanos a la superficie y sobre los estratos correspondientes a h_c , en donde es 1 de la profundidad de transición entre los niveles superficiales y los de fondo, siempre menor que la profundidad mínima (h_{min}). Para la simulación en modo AGRIF se eligió una condición de frontera tipo esponja de 3000 metros de ancho y de (coeficiente de relajación aplicado a las zonas de anidado) de $100 \text{ m}^2/\text{s}$ (SPONGE), la cual aplica un suavizado en la frontera para evitar inestabilidades cuando los valores calculados en el interior de la malla difieren a los valores de la frontera. Dicha configuración forma parte del archivo *roms.in*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primer Caso de Estudio

Para el primer caso de estudio, la simulación se realizó con un conjunto de datos climatológicos mensuales del Atlas Oceánico Mundial (World Ocean Atlas 2009), inicializándose la simulación en enero para un período de tiempo de 2 meses, con una resolución de 1.3 km y un paso temporal baroclínico de 2 segundos. Teniendo en cuenta, además, que los resultados obtenidos para este caso de estudio son característicos de estos meses para un año cualquiera.

Esta simulación reproduce el patrón de circulación promedio de esta zona, las magnitudes más altas (1.44 m/s) de las corrientes simuladas se localizan en el centro del Canal Viejo de Bahamas (Figura 2). En el cual, el modelo ROMS_AGRIF reproduce una corriente intensa (máxima de 1 m/s) hacia el NW, independientemente del efecto del viento también presenta un giro ciclónico en su extremo SW, hacia el ASC, y un giro anticiclónico en el NW, hacia Bahamas coincidiendo con lo planteado por Arriaza *et al.*, 2015. Cabe resaltar que se corroboró que en las zonas abiertas de las bahías interiores e incluso en algunas pasas y canales entre los cayos interiores la circulación media toma diferente orientación en dependencia de la dirección del viento y las velocidades de las corrientes son superiores. Mientras que en los canales y pasas exteriores la dirección depende de la fase de marea principalmente.

La circulación al norte tanto de Cayo Frago como de los Cayos Dromedarios está determinada por un vórtice, que puede variar en el tiempo manteniendo un movimiento este a

oeste y viceversa con una circulación tanto ciclónica como anticiclónica, pero ubicándose siempre en las proximidades del cayo. Esta circulación que se genera en la zona provoca que las corrientes de plataforma de la costa norte de Cayo Frágoso tomen diferente sentido, en dependencia del comportamiento del vórtice. Las velocidades de la corriente en la región pueden oscilar entre 0.2 y 0.4 m/s (Figura 2).

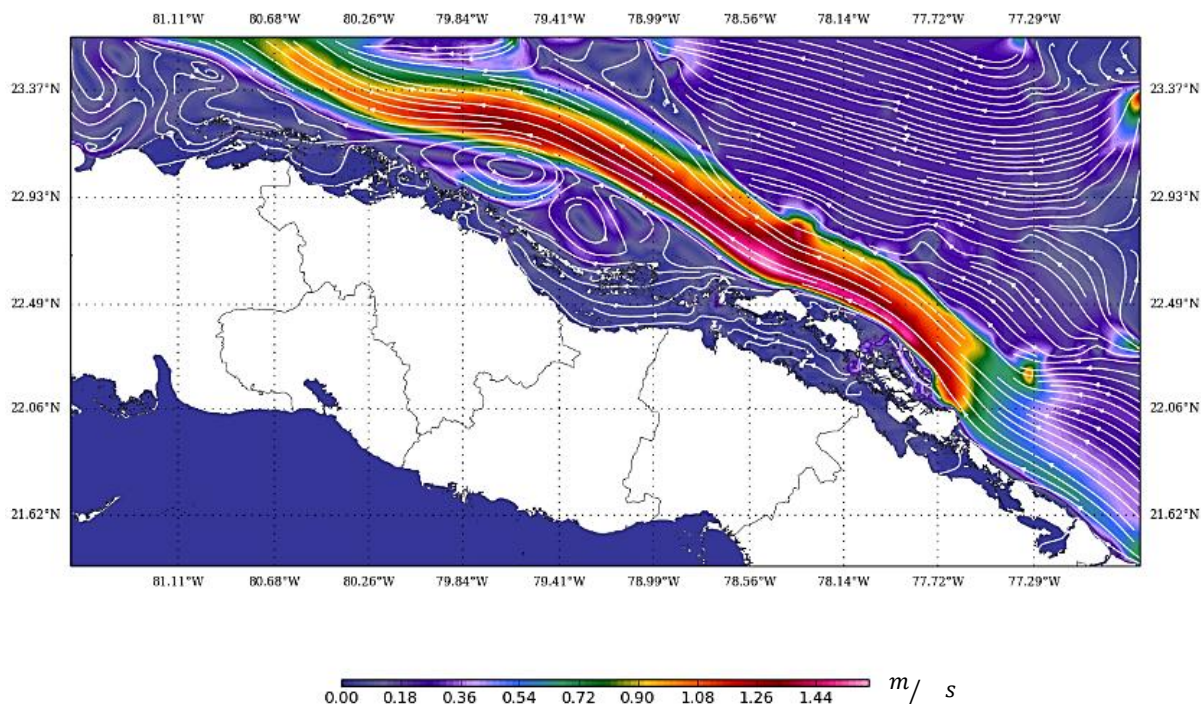


Figura 2. Circulación habitual en el archipiélago Sabana-Camagüey para los meses de enero a febrero (líneas de flujo).

Figure 2. Usual circulation in Sabana-Camagüey Archipelago between January and February (stream lines).

Para un mejor entendimiento de las salidas se ampliaron diferentes regiones del área de estudio:

La simulación para la región comprendida entre Varadero y Cárdenas muestra una circulación mayor con dirección NW en la entrada de la Bahía de Varadero, en cambio en el interior de ella las corrientes son débiles y no exceden los 0.03 m/s. Se puede observar un intercambio entre el límite de la Bahía de Cárdenas y la parte oeste de la Bahía de Santa Clara, donde se muestra un flujo que puede alcanzar valores de hasta 0.09 m/s en dirección oeste (Figura 3 y Figura 4).

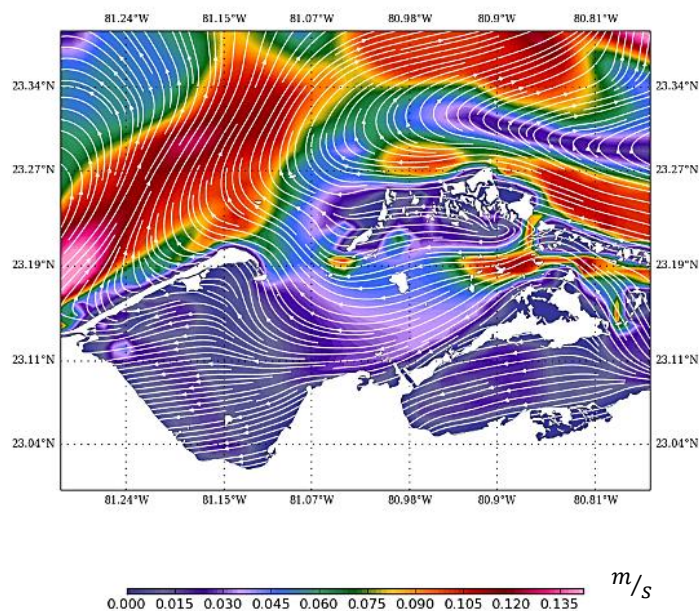


Figura 3. Circulación habitual para los meses de enero a febrero en la Bahía de Cárdenas (líneas de flujo).
Figure 3. Usual circulation from January to February in Cardenas Bay (stream lines).

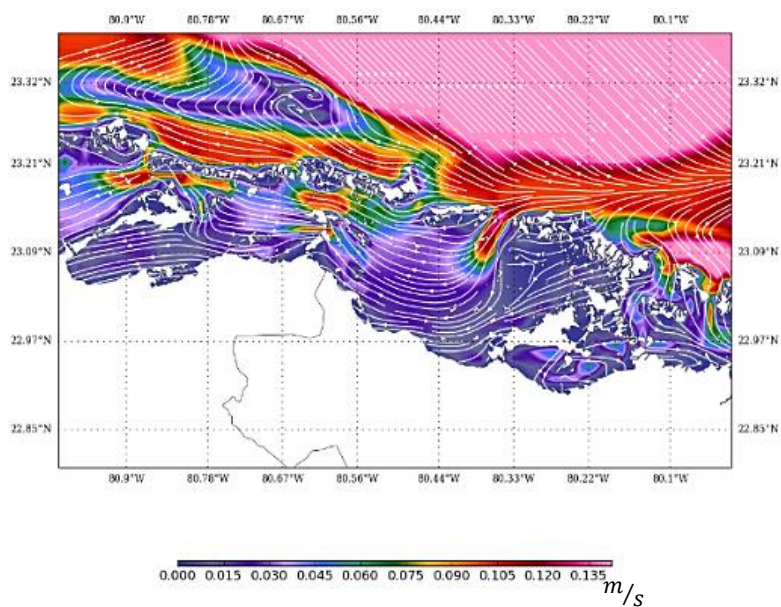


Figura 4. Circulación habitual para los meses de enero a febrero en la Bahía de Santa Clara (líneas de flujo).
Figure 4. Usual circulation from January to February in Santa Clara Bay (stream lines).

La dirección predominante de las corrientes en la Bahía de Santa Clara es de sentido oeste, tanto en su porción oriental como occidental, con valores entre los 0.01 hasta los 0.03 m/s. En cambio, en los canales y pasas los valores alcanzan 0.1 m/s. Esta bahía posee un mayor

intercambio con la región exterior de la cayería, permitiendo que esta tenga una mayor influencia de la marea.

En la región comprendida entre la Bahía de Buena Vista y Cayo Santa María la dirección de la corriente es predominantemente al oeste, con valores que van desde las calmas hasta valores que no exceden los 0.072 m/s. En cambio, en las regiones donde se presentan canales y pasas las corrientes son superiores, alcanzando valores de hasta 0.18 m/s (Figura 5).

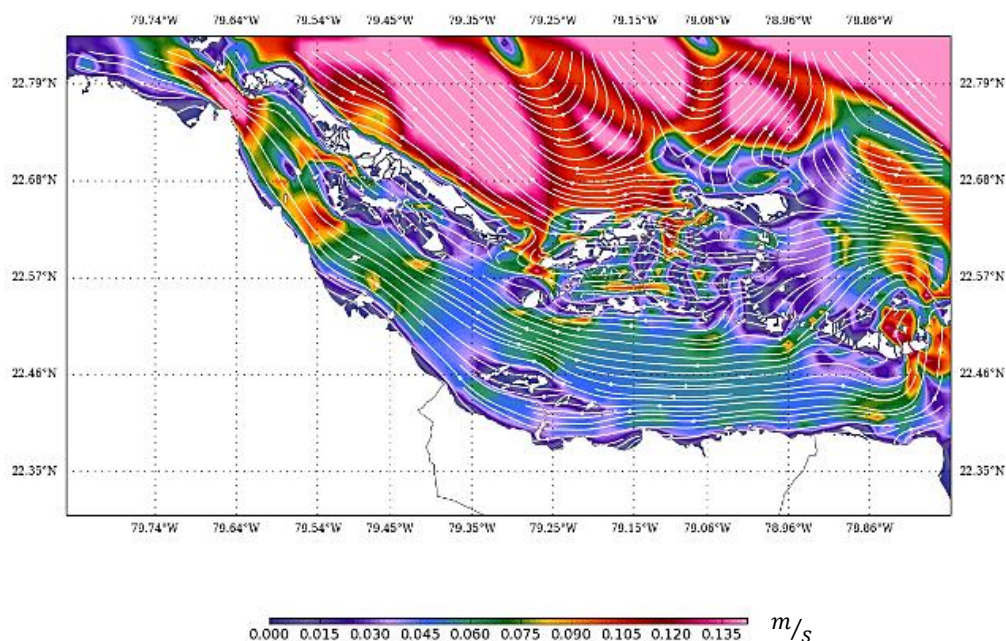


Figura 5. Circulación habitual para los meses de enero a febrero en la Bahía de Buena Vista (líneas de flujo).

Figure 5. Usual circulation from January to February in Buena Vista Bay (stream lines).

Segundo Caso de Estudio

Para el segundo caso de estudio la simulación se realizó con un conjunto de datos climatológicos mensuales del Atlas Oceánico Mundial (*World Ocean Atlas*, 2009), inicializándose la simulación en julio para un período de tiempo de tres meses. Con una resolución para la rejilla gruesa de tres (3) km y la fina de un (1) km, utilizando un paso temporal baroclínico de seis y tres segundos respectivamente.

Con la simulación realizada se ha obtenido un buen resultado. La simulación ha reproducido satisfactoriamente la dinámica del archipiélago, con valores de intensidad de la corriente de hasta 0.1 m/s principalmente en la región del Canal Viejo de las Bahamas, donde predomina una circulación en sentido noroeste.

También se pudo observar, al igual que para el primer caso de estudio, un vórtice al norte en este caso de Cayo Dromedario, que presenta para estos meses una circulación en sentido anticiclónico (Figura 6).

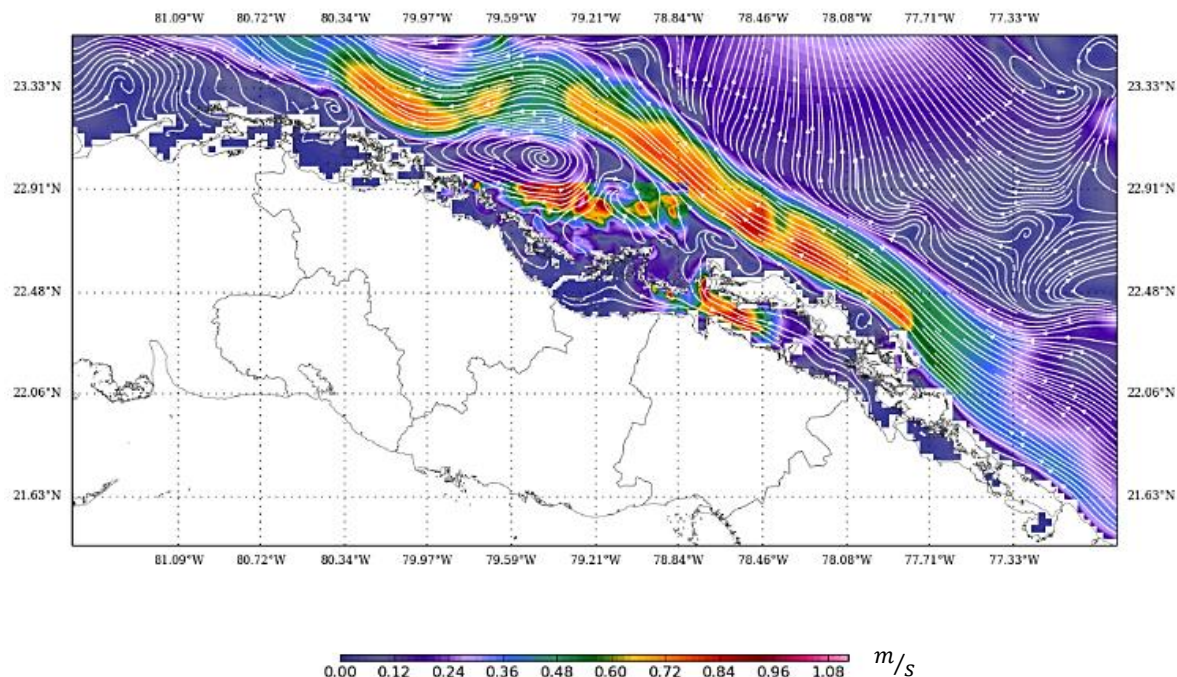


Figura 6. Circulación media para el archipiélago de Sabana Camagüey para los meses de julio a septiembre (líneas de flujo).

Figure 6. Average circulation for Sabana Camagüey Archipelago from July to September (stream lines).

El funcionamiento del anidado del modelo en las regiones de entrada de flujo a la rejilla fina tuvo comportamiento favorable, logrando representar correctamente la circulación, representando las corrientes sin perturbaciones significativas al paso por la frontera (Figura 6). Sin embargo, en las regiones de salida de flujo los resultados no fueron lo esperado, pues se presentó una diferencia entre los valores de la frontera de la rejilla fina y la gruesa. Estas diferencias se deben principalmente a que no fue posible la utilización de un anidado en dos direcciones (*two-way*), además de que las condiciones de frontera de tipo SPONGE son adecuadas para asimilar la información que proviene del exterior, pero no transmiten información a la rejilla gruesa.

Para esta simulación se obtuvo que, en la mitad oriental del pedraplén las corrientes presentan una desviación hacia el norte al encontrarse con el pedraplén, el cual representa una barrera sin intercambio, obteniéndose intensidades de las corrientes de hasta 0,026 m/s en esta zona. En los canales y pasas los valores de intensidad son superiores alcanzando los 0.2 m/s (Figura 7).

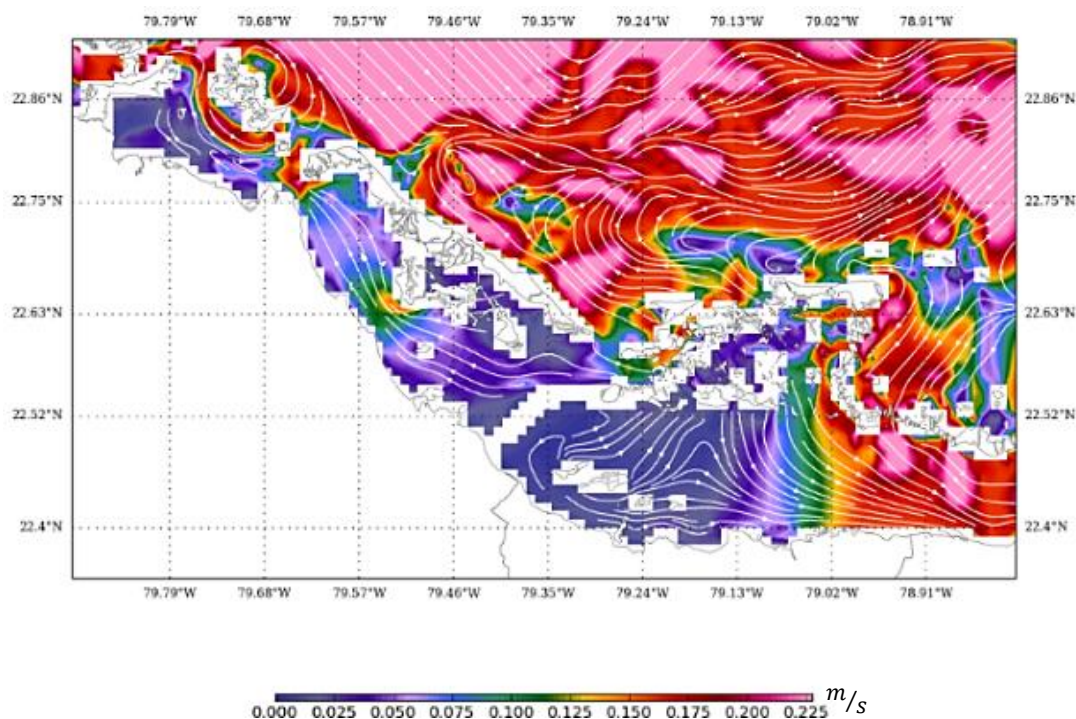


Figura 7. Circulación media para la Bahía de Buena Vista para los meses de julio a septiembre (anidado).

Figure 7. Average circulation for Buena Vista Bay from July to September (nested).

Se realizó un análisis más detallado por las principales bahías del ASC, para una mejor comprensión de los resultados.

Para este caso de estudio, las corrientes simuladas en los meses de julio a septiembre en la Bahía de Cárdenas presentan los máximos de intensidad de las corrientes en la entrada de la bahía (0.09 m/s), donde se presenta un flujo noroeste. Sin embargo, en el interior de la bahía se obtiene una circulación en sentido anticiclónica debido fundamentalmente a la configuración geográfica de la bahía, obteniéndose valores que no sobrepasan los 0.05 m/s. Se observó un fuerte intercambio entre la Bahía de Cárdenas y la región oeste de la bahía de Santa Clara presentando valores hasta los 0.1 m/s (Figura 8).

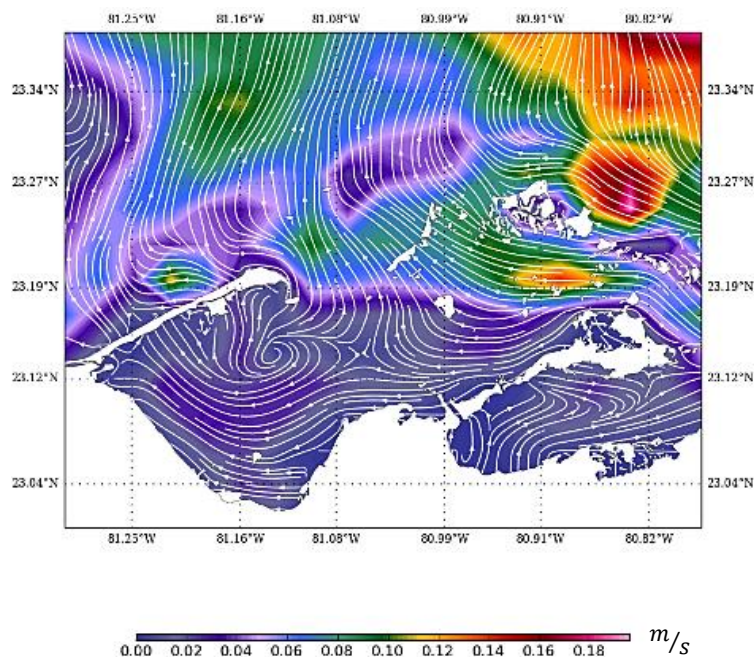


Figura 8. Circulación media para la Bahía de Cárdenas para los meses de julio a septiembre (líneas de flujo).

Figure 8. Average circulation for Cardenas Bay from July to September (stream lines).

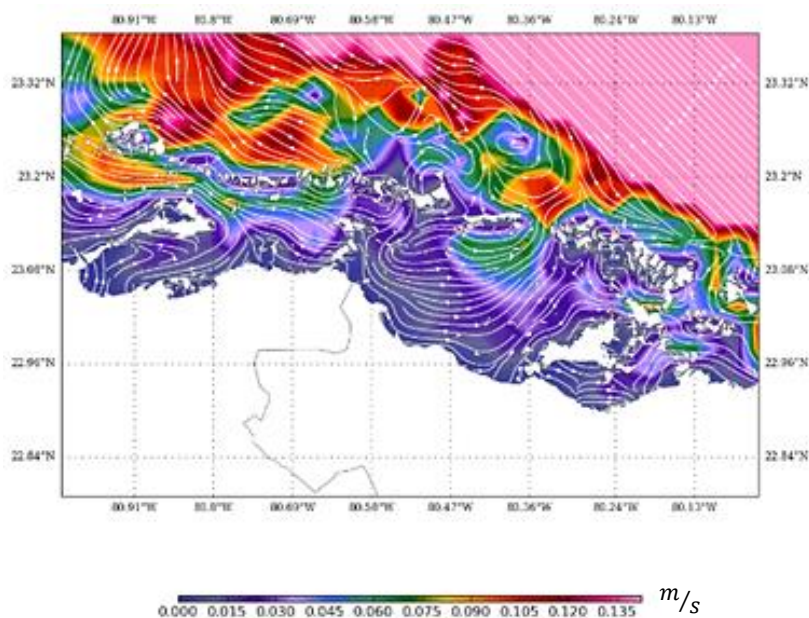


Figura 9. Circulación media para la Bahía de Santa Clara para los meses de julio a septiembre (líneas de flujo).

Figure 9. Average circulation for Santa Clara Bay from July to September (stream lines).

Para el interior de la bahía de Santa Clara, se obtuvo valores de intensidad de la corriente de hasta 0.06 m/s con una dirección predominante en sentido oeste en su porción occidental; sin embargo, en la porción oriental de la bahía las direcciones varían en dirección Este. En los canales y pasas se presentó los máximos de corrientes con valores que pueden llegar hasta 0.1 m/s. En la región sur de cayo Blanquizar, se destacó un flujo en dirección oeste con valores de hasta 0,08 m/s (Figura 9).

De forma general, los resultados obtenidos para la simulación no fueron los esperados, debido a que el modelo sobredimensionó o sobreestimó los valores de intensidad de la corriente, comparados con las mediciones correspondientes a este período. Presuponemos que esto pudo deberse a estimados batimétricos errados de la base de datos batimétrica, ya que esta zona es muy aislada y azolvada, y no siempre bien interpretada desde el punto de vista batimétrico por la teledetección.

Cálculo de errores de la velocidad media de las corrientes

Para el primer caso de estudio se estableció un análisis para la verificación de los valores de intensidad de la corriente simulada con los datos de las corrientes marinas medidas (ASC) correspondientes a los archivos de GEOCUBA-Estudios Marinos y del Instituto de Oceanología. Mientras que para el segundo caso de estudio se verificó con datos reales de las campañas Oceanográficas para los meses de julio a septiembre del 2013.

Para el cálculo de los errores de la simulación de las corrientes marinas se tuvo en cuenta lo planteado por Ezer y Mellor (1994), quienes afirmaron que las corrientes marinas simuladas en una zona determinada de aplicación son válidas si el error de los valores calculados representa menos del 30 % de los valores medidos. En conversación con oceanógrafos del área, se pudo dilucidar, que debido a que esta zona de la plataforma cubana se considera como lagunas costeras de renovación limitada, muy someras, con áreas de azolvación específicas y canales estrechos, sinuosos y poco profundos, es posible subir un poco este límite, hasta un 40 %, por ejemplo. Solo con el perfeccionamiento de la implementación del modelo (condiciones de fronteras, batimetría específica, línea de costa cada vez más exacta, bases de datos hidrológicos e hidrodinámicos locales, etc.) podremos subir las exigencias al respecto.

Se calculó el error absoluto y relativo entre la corriente simulada y observada obteniendo en la mayoría de las estaciones errores menores al 30 %, señalándose en negrita los valores que se encuentran dentro del rango de error permitido (Tabla 1).

En los casos del este de Bahía de Cárdenas y norte-noroeste de La Esperanza, estimamos esto se debe a la exigua profundidad real de estas zonas, sobredimensionadas por la base batimétrica del modelo. En el de Boca de Sagua La Grande, debido, presumiblemente, a la alta variabilidad de las corrientes marinas que aquí tiene lugar. Recordemos que comparamos con valores medios anuales para una estación.

Tabla 1. Errores calculados para la velocidad de la corriente (cm/s).

Table 1. Calculated errors for current speed (cm/s).

Estaciones	Observada	Simulada	Error Absoluto	Error Relativo (%)
Sur de Cayo Buba, noreste de Bahía de Cárdenas	2,00	1,79	0,21	10,29
Noreste de punta de Morlas	6,00	5,13	0,87	14,50
Este-noreste de Bahía de Cárdenas	2,00	1,65	0,35	17,38
Este de Bahía de Cárdenas	2,00	0,34	1,66	83,12

Estaciones	Observada	Simulada	Error Absoluto	Error Relativo (%)
Norte-noroeste de La Esperanza	2,22	1,08	1,14	51,33
Boca Falcones	4,10	3,49	0,61	14,82
Boca de Sagua La Grande	8,00	3,79	4,21	52,68
Entre Punta Higuera y Punta de Pájaro (Cayo Frago)	10,80	10,85	0,05	0,49
Noreste de punta gorda	3,00	4,10	1,10	36,63
Entre cayo Romano y loma Guaney	7,00	5,05	1,95	27,88

Para el segundo caso de estudio se aprecia una sobreestimación de los valores de las corrientes para el modelo, lo cual puede estar relacionado con cierta incapacidad del modelo para representar las irregularidades de la marea, en esta área geográfica, de acuerdo con la configuración adoptada. Estimamos que este problema debe solucionarse, en la medida que introduzcamos los datos mareográficos de la Red Mareográfica Nacional.

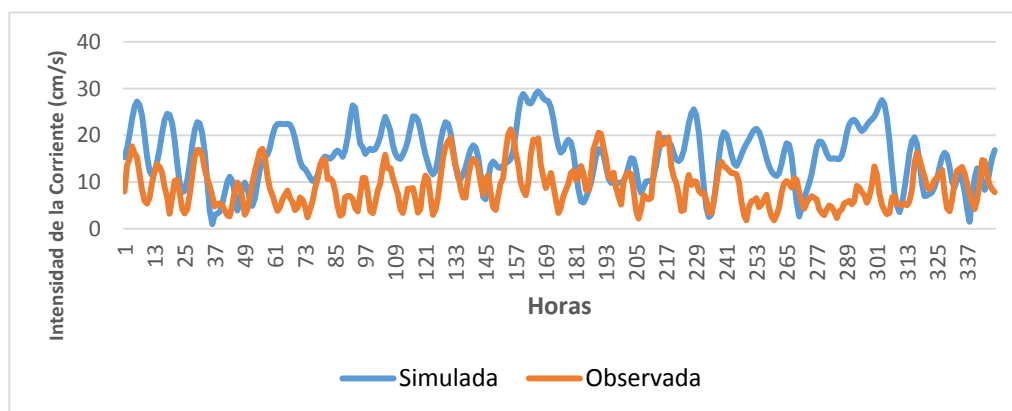


Gráfico 1. Valores de intensidad de la corriente para Cayo Santa María.

Graph 1. Current intensity values for Cayo Santa María.

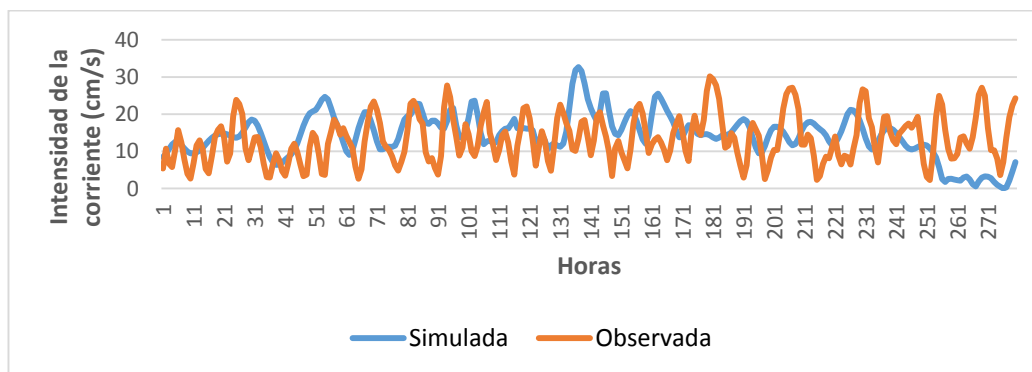


Gráfico 2. Valores de intensidad de la corriente para Cayo Francés.

Graph 2. Current intensity values for Cayo Francés.

En la Gráfica 1 se puede apreciar la variación de la intensidad de las corrientes marinas para la estación de Cayo Santa María (22.66° latitud N y 78.81° longitud W), para un período de 14 días del mes de agosto, siendo la sobrestimación del modelo mucho más marcado en esta estación. En la Gráfica 2 se puede apreciar la variación de la intensidad de las corrientes marinas para la estación de Cayo Francés (22.65° latitud N y 79.25° longitud W), para un período 11 días en el mes de agosto, en este caso la sobrestimación del modelo es relativamente baja en comparación con la estación anterior.

Los mayores valores en los errores obtenidos se deben fundamentalmente a la diferencia entre la discreticidad temporal de los datos de forzamiento del modelo y los datos reales para la verificación, lo que implica errores en los resultados obtenidos.

CONCLUSIONES

Se asimiló, configuró e implementó correctamente el modelo ROMS_AGRIF para el análisis del comportamiento de las corrientes marinas para el área del archipiélago de Sabana-Camagüey, incluyendo el efecto de los constituyentes fundamentales de la marea.

Al norte de Cayo Frágoso, se obtuvo un vórtice con circulación tanto ciclónica como anticiclónica pero ubicándose siempre en las proximidades del cay.

En la mitad oriental del pedraplén de Cayo Santa María las corrientes presentan una desviación hacia el norte al encontrarse con el pedraplén, el cual representa una barrera sin intercambio, obteniéndose intensidades de las corrientes de hasta 0,026 m/s en esta zona.

Dentro del archipiélago las direcciones predominantes de las corrientes es hacia el noroeste, presentándose las mayores intensidades en los canales y pasas.

Se lograron resultados satisfactorios en las simulaciones de las corrientes marinas, incluyendo el efecto de la marea, toda vez que, para la mayoría de los resultados obtenidos, el error de los valores calculados representó menos del 30 % de los valores medidos, concordando así con las mediciones puntuales en el archipiélago Sabana – Camagüey.

REFERENCIAS

- Álamo, B., Loza, S., Sánchez, M. y Montalvo, J. F. (2013). Evaluación del estado trófico de seis bahías interiores del archipiélago Sabana - Camagüey, Cuba, mediante el empleo de clorofila-a como bioindicador. *Serie Oceanológica*, No. 13, ISSN 2072-800x. <http://oceanologia.redciencia.cu>
- Arriaza, L., Rodas, L. y Hernández, M. (2002). Corriente superficial inducida por el viento y las mareas en la Bahía de Santiago de Cuba. *Contribución a la educación y la protección ambiental* VIII Taller, ISBN 959-7136-11-39
- Arriaza, L., Rodas, L., Hernández, M. y J. Simanca (2004). Simulación de la circulación inducida por el viento y las mareas en el Golfo de Batabanó. *Revista de Investigaciones Pesqueras*, No. 1.
- Arriaza, L., Rodas, L., Hernández, M., Simanca, J., y Lorenzo S. (2008). Corrientes marinas en la plataforma suroriental cubana. *Serie Oceanológica*, No. 4, ISSN 2072-800x. <http://oceanologia.redciencia.cu>
- Arriaza, L., Hernández, M., Lorenzo, S. y Olivera J. (2012). Modelación numérica de corrientes marinas alrededor del occidente de Cuba. *Serie Oceanológica*, No. 10, ISSN 2072-800x. <http://oceanologia.redciencia.cu>
- Beckmann, A. and Haidvogel, D.B. (1993). Numerical simulation of flow around a tall, isolated seamount. Part I: Problem formulation and model accuracy. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 23, pp 1736-1753.



- Correa, D., Tam, J., Pasapera, J., Saavedra, M. and Ingunza, A. (2008). Modeling marine circulation and hypothetical discharges in Callao Bay, Peru. *Inf. Inst. Mar Peru*, Vol 35(3), pp 181-192.
- Defne, Z., Haas, K. A. and Fritz, H. M. (2011). Numerical modeling of tidal currents and the effects of power extraction on estuarine hydrodynamics along the Georgia coast, USA. *ELSEVIER, Renewable Energy*, pp 1-11.
- Escobar, M. G. (2012). Validación del modelo numérico ROMS en la región ecuatorial comprendida entre la costa ecuatoriana y las Islas Galápagos. Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Fernández, L., A. Chirino, L. y Colaboradores. (1993). Atlas oceanográfico de las aguas del archipiélago Sabana - Camagüey. I.C.H. Departamento de Investigaciones de Oceanografía Física, La Habana. 235 pp.
- Fernández, L., López, D. y Ramírez, O. (2007). Características termohalinas de las aguas de la plataforma cubana. Serie: "El agua en Iberoamérica". Vol. 12: "Efectos de los cambios globales sobre los recursos hídricos y ecosistemas marino costeros". Alicia Fernández Cirelli, Lucas Fernández Reyes y Alejandra Volpedo (Eds). Buenos Aires. CYTED – Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Red CYTED 406RT0285. ISBN 978-987-96413-2-3.
- Forcadell, J. E. (2011). Estudio de la amplitud de marea en los puertos españoles del Mediterráneo, Diplomatura en Navegación Marítima.
- Gan, J. and Allen, J. S. (2005). On open boundary conditions for a limited-area coastal model off Oregon. Part 1: Response to idealized wind forcing. *ELSEVIER, Ocean Modelling*, Vol. 8, pp 115-133.
- García, C., Chirino, A. L. y Rodríguez, J. P. (1991). Corrientes geostróficas en la ZEE al sur de Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*, Vol 12.
- Gómez, J. A. (1979). Corrientes geostróficas alrededor de Cuba, *Revista Cubana de Investigaciones Pesqueras*, 4.
- Haidvogel, D.B. and Beckmann, A. (1999). Numerical Ocean Circulation Modeling. Imperial College Press.
- Haidvogel, D.B., Arango, H., Budgell, W.P., Cornuelle, B.D., Curchitser, E., *et al.* (2007). Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. *ELSEVIER, Journal of Computational Physics*.
- Hedström, K. S. (2009). DRAFT Technical Manual for a Coupled Sea-Ice/Ocean Circulation Model (Version 3).
- Knauss, J. A. (1996). Introduction to Physical Oceanography, Segunda Edición.
- Li, *et al.* (2001). A comparison of Two Vertical-Mixing Schemes in a Pacific Ocean General Circulation Model, pp 1377-1398.
- Liste, M. (2009). Patrones de circulación oceánica en el litoral español. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.
- Lizano, O. y Alfaro, E. (2004). Algunas características de las corrientes marinas en el Golfo de Nicoya, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.*, Vol 52 (suppl. 2), pp 77-94.
- Marchesiello, P., McWilliams, J. C. and Shchepetkin, A. (2001). Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models. *ELSEVIER, Ocean Modelling*, 3, pp 1-20.
- Martínez, L. B. y Pares, S. A. (1998). Circulación del golfo de México inducida por mareas, viento y la corriente de Yucatán. *Ciencias Marinas*, Vol. 24, No. 1, pp 65-93.



- Melsom, A., Suren, V., William, L. and Budgell, P. (2009). Using the Regional Ocean Modeling System (ROMS) to improve the ocean circulation from a GCM 20th century simulation. Springer, *Ocean Dynamics*, pp 969–981.
- Mitrani, A. I. y Díaz, O. (2004). Relación entre la estructura térmica vertical de las aguas cubanas y la actividad de los ciclones tropicales. *Ciencias Marinas*, Vol. 30, No. 2, pp 335-341.
- Penven, P., Debreu, L., Marchesiello, P. and McWilliams, J. C. (2006). Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding procedure to the central California upwelling System. ELSEVIER, *Ocean Modelling*, Vol. 12, pp 157-187.
- Penven, P., Cambon, G., Tan, T., Marchesiello, P. and Debreu, L. (2010). ROMS AGRIF / ROMSTOOLS User's Guide. Institut de Recherche pour le D'veloppement.
- Qiang, W., Weidong, Z., Dongxiao, W. and Danpeng, D. (2014). Ocean model open boundary conditions with volume, heat and salinity conservation constraints. *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 31, pp 188–196.
- Rodríguez, J. P. y Rodríguez, J. E. (1983). Las mareas en las costas cubanas. Academia de Ciencias de Cuba. *Reporte de Investigación*, 6, pp 1-37.
- Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. (2005). The Regional Oceanic Modeling System (ROMS): A Split-Explicit, Free-Surface, Topography-Following-Coordinate Oceanic Model. ELSEVIER, *Ocean Modelling*, Vol. 9/4, pp 347-404.
- Stewart, R. H. (2005). Introduction to Physical Oceanography. Department of Oceanography, Texas A & M University.
- Tomczak, M. and Godfrey, J. S. (2001). Regional Oceanography: An Introduction, Version 1.0.
- Vallis, G K. (2006). Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics. Princeton University, New Jersey.