

NOTA:

DESARROLLO PRELIMINAR DE UN MODELO HIDRODINÁMICO Y DE TRANSPORTE DE NUTRIENTES PARA LA CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA

Marcos Antonio Carvajalino-Fernández^{1,2}, Oliver Lojek², Luis Fernandes³ y Lizbeth Janet Vivas-Aguas⁴

1 *Oceanography and Climate Research Group, Institute for Marine Research (IMR). P.O. Box 1870 Nordnes, 5817 Bergen, Noruega. E-mail: marcos.carvajalino.fernandez@imr.no*

2 *Ludwig-Franzius-Institute for Hydraulic, Estuarine and Coastal Engineering, Leibniz Universität Hannover. Nienburger Straße 4. 30167 Hannover, Alemania. E-mail: lojek@lufi.uni-hannover.de (O.L.)*

3 *Action Modulers Consulting & Technology. Estrada principal 29, R/C, Paz. 2640-583 Mafra, Portugal. E-mail: luisfernandes@actionmodulers.com*

4 *Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR), Calle 25 No. 2-55 Playa Salguero. Santa Marta, Colombia. E-mail: janet.vivas@invemar.org.co*

RESUMEN

Se desarrolló un modelo numérico acoplado para la simulación hidrodinámica y el transporte de nutrientes/oxígeno dentro del complejo lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta (Colombia) usando la plataforma de modelación MOHID Water. Los resultados preliminares muestran coherencia con datos de monitoreo dentro de la laguna principal y el canal de La Barra, tanto para el nivel de agua como para las fluctuaciones anuales de salinidad. Sin embargo, se requieren observaciones adicionales dentro del complejo de Pajarales para lograr una correcta representación de la hidrodinámica en todo el sistema lagunar. Debido a la limitada información sobre los coeficientes locales para las ecuaciones de transporte de nutrientes, el modulo de calidad de aguas solo ha sido capaz de simular la dinámica entre los componentes bióticos y abióticos del sistema por periodos de una semana. Por lo anterior, se requieren calibraciones adicionales de la interacción fitoplancton-nitrógeno antes de poder adelantar simulaciones de periodo extendido. Una vez ajustado, el modelo se convertirá en una herramienta importante para evaluar cambios en la dinámica del sistema frente a diversos escenarios de intervención, brindando soporte a los procesos de toma de decisiones dentro del complejo.

PALABRAS CLAVE: Modelación numérica, MOHID, Hidrodinámica, Nutrientes, Ciénaga Grande de Santa Marta.

ABSTRACT

Preliminary development of a hydrodynamic and nutrient transport model for Ciénaga Grande de Santa Marta. A coupled numerical model for hydrodynamics and nutrients/oxygen transport inside Ciénaga Grande de Santa Marta lagoon complex (Colombia) was developed using the MOHID Water modelling platform. Preliminary results show coherency with monitoring data for the main lagoon and La Barra strait, both for water level and annual salinity fluctuations. However, further observations

inside Pajarales complex are required to achieve an appropriate system-wide hydrodynamic representation. Due to a lack of sufficient information on the coefficients for the nutrient transport processes, the water quality module has only been able to simulate the dynamics between biotic-abiotic factors inside the system for weeklong periods. Therefore, further calibration of the phytoplankton-nitrogen compartment is necessary to perform long-term simulations. Once adjusted, the model will become a powerful tool to assess changes in the system dynamics under diverse intervention scenarios, providing critical support to decision making processes.

KEYWORDS: Numerical modeling, MOHID, Hydrodynamics, Nutrients, Ciénaga Grande de Santa Marta.

El complejo lagunar de la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) constituye un ecosistema estratégico para el Caribe colombiano. El complejo está caracterizado por su alta productividad primaria y su importancia en el sostenimiento de los núcleos poblacionales aledaños mediante la provisión de servicios ambientales como pesquerías artesanales, suelos aptos para la agricultura y recursos maderables (Vilardy y González, 2011).

La CGSM ha sufrido una alta intervención por parte del hombre, con los mayores impactos ambientales causados por la alteración del equilibrio hídrico del sistema y el consecuente periodo de hipersalinización tras la construcción de las carreteras Santa Marta-Barranquilla (1960) y Palermo-Salamina (1970), generando la pérdida de más de la mitad del bosque de manglar existente (Ibarra *et al.*, 2014). En la actualidad, la CGSM continúa su proceso de recuperación y es objeto de un monitoreo constante de la calidad ambiental por parte del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar). El interés de múltiples actores institucionales y la actual disponibilidad de bancos de datos sobre las variables fisicoquímicas en el complejo, lo convierten en un candidato idóneo para la construcción de un modelo numérico, como herramienta de apoyo en la toma de decisiones sobre futuras intervenciones en la ecorregión.

Existen algunos antecedentes sobre modelación numérica en la CGSM. El estudio pionero sobre hidrodinámica del área fue desarrollado por Camacho (1991) con la construcción de un modelo bidimensional de la laguna principal usando el método de diferencias finitas. Posteriormente, Toro y Gómez (1997) construyeron otro modelo para evaluar los efectos de la reapertura del caño Clarín en los campos de velocidad del sistema. A nivel de modelos de transporte, los mayores referentes son los trabajos de Lozano (2003) y Tuchkovenko y Calero (2003) que abordaron el transporte no conservativo de nutrientes, oxígeno y demanda biológica de oxígeno. Sin embargo, estos trabajos se vieron limitados por la escasez de datos de campo que permitieran una validación más exhaustiva de los modelos.

La presente nota aborda la construcción de un modelo numérico bidimensional (i.e. promediado en profundidad) usando el programa MOHID Water (IST - U. Lisboa). El modelo abarca los dos principales cuerpos de agua del

sistema lagunar, es decir, el espejo lagunar y el complejo de Pajarales, así como las principales conexiones hidráulicas entre ellos (Figura 1).

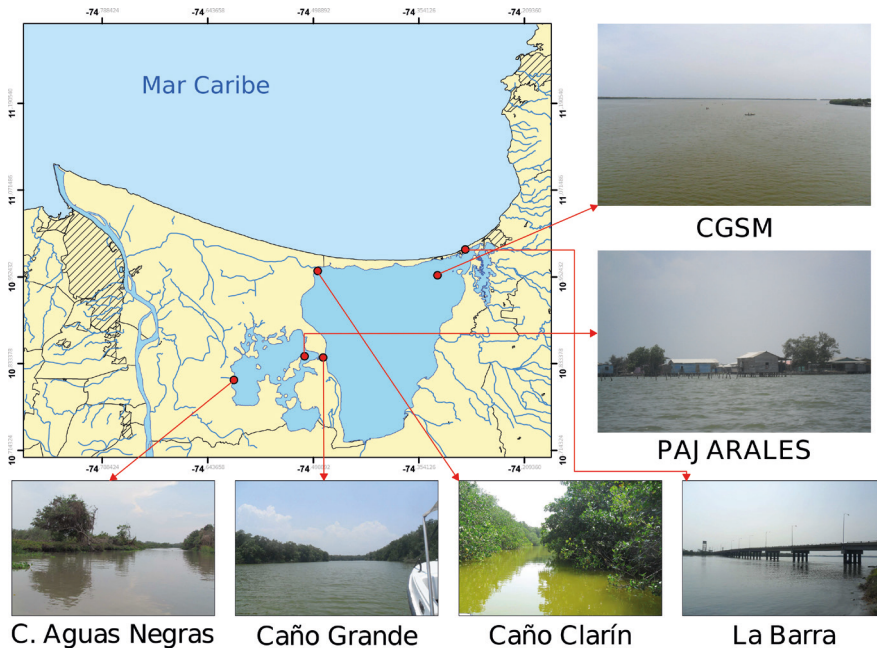


Figura 1. Dominio del modelo numérico y localidades de interés dentro del complejo lagunar Ciénaga Grande de Santa Marta. En la parte superior derecha se presentan los principales cuerpos de agua representados en el modelo, mientras que en la parte inferior se presentan los principales caños y conexiones.

El modelo está constituido por una malla estructurada de resolución variable, con elementos de 500 m en la zona marina y el interior de las ciénagas y celdas de 50 y 250 m en los sectores de La Barra y Caño Grande, respectivamente. Los refinamientos fueron implementados gradualmente con un buffer de 10 celdas alrededor de la zona de interés.

La batimetría en mar abierto fue tomada de Global Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) con resolución de 30", mientras que para la zona costera y el complejo de Pajarales se digitalizó la carta náutica COL-1203 (CIOH *et al.*, 2001) con datos de resolución aproximada de 1 km. Para el interior de la laguna principal y el sector de La Barra se usó información proveniente de un levantamiento batimétrico de detalle con resoluciones entre 50 y 100 m desarrollado por Invemar en 2015.

La condición de frontera abierta del modelo fue impuesta en forma de constituyentes de marea astronómica extraídos de la solución satelital FES2004 (Lyard *et al.*, 2007), mientras que la información meteorológica y la influencia de los ríos de la vertiente

occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta (caudales medios mensuales multianuales) fue derivada de la redes de monitoreo de IDEAM. La influencia del río Magdalena fue considerada a través de los caños Clarín y Aguas Negras. Para estos afluentes se utilizó un caudal mínimo constante de temporada seca medido en abril de 2015 durante un periodo de intensa sequía, como peor escenario para procesos de salinización del complejo.

El modelo MOHID Water implementa el método de volúmenes finitos a través de un algoritmo semi-implícito ADI, el cual le confiere mayor estabilidad numérica y permite una condición de Courant-Friedrich-Levy (CFL) más alta que 1, aunque se recomienda mantener un valor por debajo de 8. Las presentes simulaciones utilizaron un paso de tiempo variable entre 2 y 5 segundos (CFL=5.2) y un tiempo de precalentamiento de 15 días, logrando simular un mes de la hidrodinámica del complejo en un día (escalamiento de 1:30). El rendimiento computacional obtenido fue de 0.07 s/iteración en procesadores de 2.3-2.4 GHz y 4 GB de RAM.

En la zona costera, el modelo hidrodinámico fue calibrado contra los constituyentes astronómicos de marea locales, los cuales fueron extraídos utilizando la herramienta T_Tide de MATLAB (Pawlowicz *et al.*, 2002) sobre registros de nivel de agua en la estación mareográfica de Santa Marta. Los resultados (Figura 2) muestran una adecuada representación del comportamiento de marea mixta semidiurna de la zona. Sin embargo, se observa un desfase importante en la magnitud de los picos durante la marea de sicigia, requiriendo un ajuste más detallado de los constituyentes correspondientes.

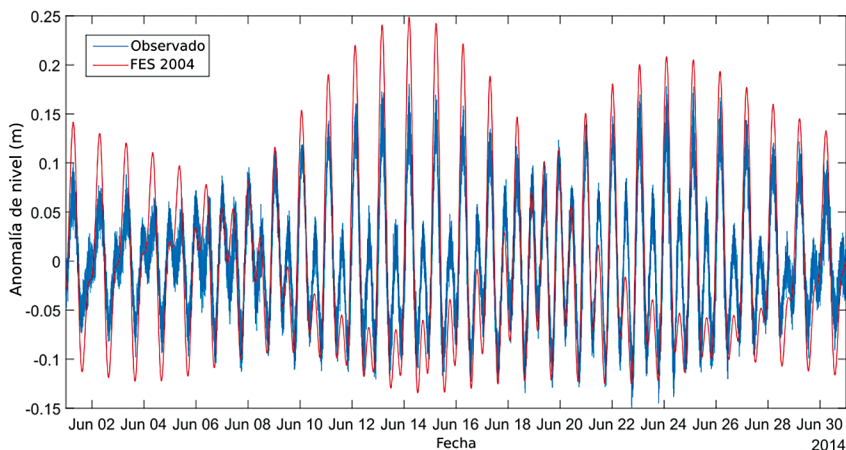


Figura 2. Comparación de mareas astronómicas observadas (línea azul) y simuladas para el modelo (línea roja).

Una calibración adicional del modelo hidrodinámico fue realizada en el sector de La Barra, usando registros de velocidad con ADCP tomados por Invemar en julio de

2015. Con base en estos registros se determinaron valores de 0.025 para el coeficiente de rugosidad de fondo (Manning) y $30 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para el coeficiente de viscosidad turbulenta horizontal (N_h). Estas aproximaciones deben ser ajustadas mediante nuevas campañas de medición de corrientes por periodos más largos, cubriendo por lo menos un ciclo completo de mareas. Los patrones anuales de salinidad dentro de la CGSM fueron simulados para condiciones meteorológicas estándar y comparados con datos medios mensuales observados en el monitoreo de calidad de Invemar (Figura 3).

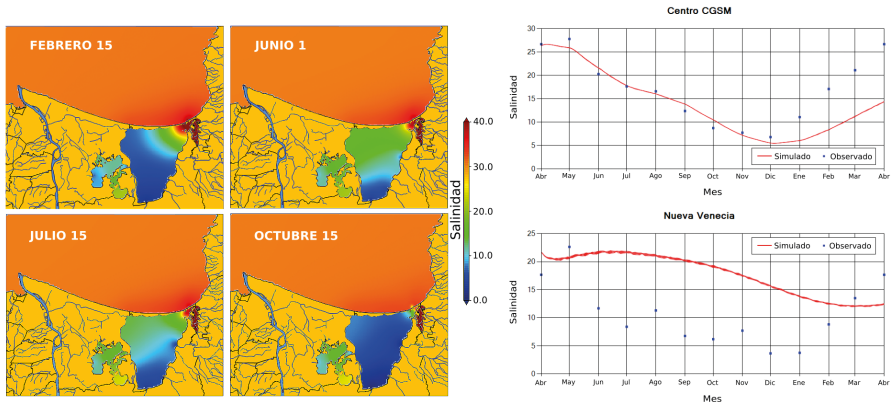


Figura 3. Simulación de los patrones de salinidad dentro del complejo CGSM durante un año promedio. El panel izquierdo muestra una profunda incursión salina hacia el sistema durante los meses de sequía y una dulcificación del sistema en la época de lluvias, consistente con los mayores aportes de los ríos provenientes de la Sierra Nevada. Los paneles de la derecha muestran la comparación de los valores simulados por el modelo y observados en estaciones dentro del espejo lagunar (arriba) y el complejo de Pajarales (abajo).

Los resultados demuestran que el modelo hidrodinámico representa muy bien los procesos de mezcla en la laguna principal, a pesar de registrar salinidades más bajas que las observadas en la época posterior a la temporada de lluvias. Lo anterior, se puede atribuir a fallas en la definición de los caudales provenientes de la Sierra Nevada de Santa Marta. El modelo no logra representar adecuadamente las reducciones estacionales de salinidad dentro del complejo de Pajarales (estación Nueva Venecia, Figura 3), lo cual indica que es necesario mejorar los datos de entrada respecto a los aportes del río Magdalena a través del caño Aguas Negras.

El modelo de transporte de nutrientes fue construido incluyendo los componentes de fitoplancton, bentos, deposición-resuspensión de materia orgánica particulada, nitrógeno (amonio, nitratos, nitritos, nitrógeno orgánico), fósforo (ortofosfatos, fósforo orgánico) y zooplancton para intentar reproducir la dinámica entre componentes abióticos y bióticos del complejo lagunar usando el módulo *water quality* de MOHID Water. El modelo de calidad es altamente complejo debido a las múltiples interacciones que existen entre los componentes del sistema fitoplancton-

nutrientes dentro de la CGSM, con más de 40 parámetros de alta sensibilidad para los procesos químicos y biológicos. Los valores iniciales para estos parámetros fueron tomados de Sarmiento *et al.* (1993) y Tuchkovenko y Calero (2003).

Las condiciones de frontera e iniciales del modelo de calidad fueron tomadas de registros del programa de monitoreo de la calidad del agua de Invemar, mientras que los parámetros de crecimiento fueron ajustados con base en características reportadas en estudios sobre la dinámica y composición del fitoplancton en la CGSM, tales como: mayor densidad de cianobacterias a lo largo del año, tasas de crecimiento aceleradas, alta relación C:Clorofila α , marcada influencia de las variables salinidad, transparencia y nutrientes nitrogenados (Gocke *et al.*, 2003; De la Hoz, 2004; Acosta, 2012). En su estado actual, el modelo de calidad es capaz de sostener simulaciones durante periodos cortos, en el orden de semanas, lo cual ha permitido identificar de manera preliminar algunas áreas de riesgo de eutrofización por crecimiento excesivo de la biomasa fitoplanctónica y/o restricción del flujo (Figura 4). Esas áreas se localizan principalmente en el complejo de Pajarales, para el cual se identificaron tiempos de retención excesivamente largos y en donde históricamente se han registrado varios fenómenos de mortandad de peces por bajos niveles de oxígeno.

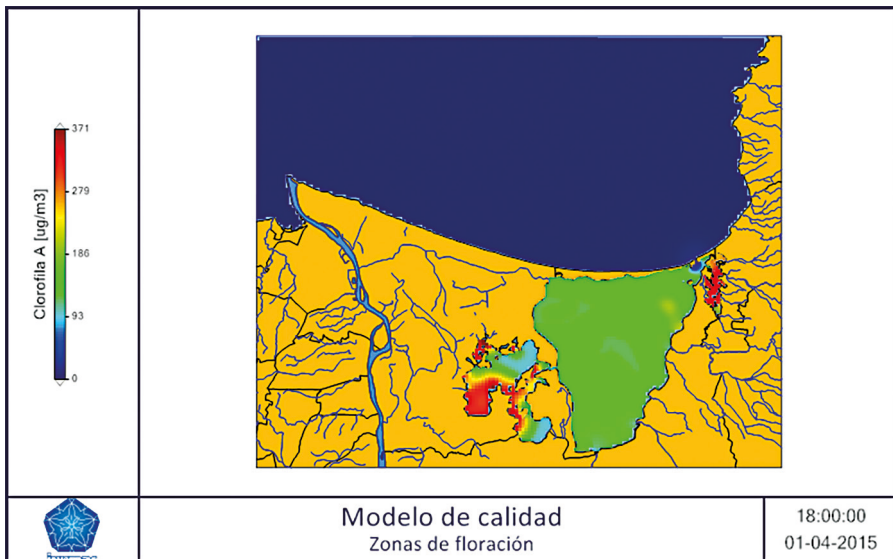


Figura 4. Valores de clorofila α simulados por el modelo para la temporada seca de 2015 bajo condiciones medias de flujo en el sistema. Se pueden observar focos de crecimiento de fitoplancton en la zona suroccidental del complejo de Pajarales y la Ciénaga de Sevillano (en rojo) que pueden desencadenar eventos de hipoxia durante la fase de respiración y decaimiento de la biomasa.

El modelo requiere calibración adicional de los parámetros concernientes a la relación entre el crecimiento fitoplanctónico y las concentraciones de las especies de nitrógeno inorgánico biodisponibles (i.e. amonio y nitrato). Las diversas pruebas del modelo muestran una reducción progresiva de la biomasa fitoplanctónica en las simulaciones a largo plazo, por limitación de nitrógeno en la fase fotoactiva del fitoplancton. Se espera continuar el presente trabajo en el futuro cercano, enfatizando en la optimización de los parámetros del modelo para alcanzar un nivel operativo y que la herramienta pueda ser aplicada como un apoyo a la toma de decisiones en futuros proyectos de intervención al complejo lagunar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Invermar por la financiación parcial de la fase de campo y toma de datos a través del convenio de cooperación académica 001-15 y el BPIN 2015, así como el acceso a las bases de datos del monitoreo de calidad en la zona de estudio. Al Servicio Alemán de Intercambio Estudiantil (DAAD) por la financiación de los viajes entre Alemania-Colombia en el marco de la beca de estudios de postgrado concedida a M. C. A Eduardo Jauch por su apoyo en la compilación de MOHID en el sistema operativo Linux y a Rania Taha por la corrección de estilo. Esta publicación es un producto derivado del trabajo de grado de M. C. para optar por el título de M. Sc. en Water Resources and Environmental Management (Leibniz Universität Hannover).

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, E. 2012. Caracterización espacial y temporal de la estructura de la comunidad de fitoplancton y su correlación con algunas variables ambientales locales en la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. Universidad Industrial de Santander. Tesis de Pregrado. Bucaramanga, Colombia. 107 p. + anexos.
- Camacho, L. 1991. Implementación de un modelo hidrodinámico y de transporte de contaminantes bi-dimensional y su aplicación al caso de la Ciénaga Grande de Santa Marta. Universidad de los Andes. Tesis de Maestría. Bogotá. 113 p. + anexos.
- CIOH, INVERMAR y CORPAMAG. 2001. Mapa batimétrico del complejo lagunar Ciénaga Grande de Santa Marta. Carta náutica COL 1203.
- De la Hoz, M. 2004. Dinámica del fitoplancton de la Ciénaga Grande de Santa Marta, Caribe colombiano. Bol. Invest. Mar. Cost., 33: 159-179.
- Gocke, K., J. Mancera, L. Vidal y D. Fonseca. 2003. Planktonic primary production and community respiration in several coastal lagoons of the outer delta of the Río Magdalena, Colombia. Bol. Invest. Mar. Cost., 32: 125-144.
- Ibarra, K. P., M. Gómez, E. Vilorio, E. Arteaga, I. Cuadrado, M. Martínez, Y. Nieto, J. Rodríguez, L.



- Licero, L., Perdomo, S., Sánchez, J., Romero y M. Rueda. 2014. Monitoreo de las condiciones ambientales y los cambios estructurales y funcionales de las comunidades vegetales y los recursos pesqueros durante la rehabilitación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. INVEMAR. Informe técnico final. Santa Marta. 140 p. + anexos.
- Lozano, J. 2003. Desarrollo de un modelo bidimensional hidrodinámico y de calidad en cuerpos de agua poco profundos. Universidad de los Andes. Tesis de Maestría. Bogotá. 117p. + anexos
- Lyard, F., F. Lefevre, T. Letellier y O. Francis. 2006. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dyn.*, 56 (5-6): 394–415.
- Pawlowicz, R., R. Beardsley y S. Lentz. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Comput. Geosci.*, 28 (8): 929–937
- Sarmiento, J., R. Slater, M. Fasham, H. Ducklow, J. Toggweiler y G. Evans. 1993. A seasonal three-dimensional ecosystem model of nitrogen cycling in the North Atlantic euphotic zone. *Global Biogeochem. Cycl.*, 7 (2): 417-450.
- Toro, F. y E. Gómez. 1997. Simulación numérica del efecto del caño Clarín en los patrones de circulación de la Ciénaga Grande de Santa Marta. *Av. Rec. Hidr.*, 4: 73-90.
- Tuchkovenko, Y. y L. Calero. 2003. Modelo numérico de calidad de aguas para la Ciénaga Grande de Santa Marta. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 32: 145-167.
- Vilardy, S. y J. González. 2011. Repensando la Ciénaga: nuevas miradas y estrategias para la sostenibilidad en la Ciénaga Grande de Santa Marta. Universidad del Magdalena y Universidad Politécnica de Madrid, Santa Marta. 216 p.

RECIBIDO: 25/01/2015

ACEPTADO: 10/11/2016