



La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia



F. Torres-Bejarano^{a,*}, J. Padilla Caba^a, C. Rodríguez Cuevas^b, H. Ramírez León^c y R. Cantero Rodelo^a

^a Universidad de la Costa CUC, Calle 58 # 55 66, Barranquilla, Colombia

^b Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Álvaro Obregón, 64, San Luis Potosí, México

^c Instituto Mexicano del Petróleo, Lázaro Cárdenas, 152, México D.F., México

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Recibido el 3 de diciembre de 2014

Aceptado el 13 de abril de 2015

On-line el 20 de junio de 2015

Palabras clave:

Modelación hidrodinámica
Gestión de los recursos hídricos
EFDC Explorer

R E S U M E N

El embalse del Guájaro, en el norte de Colombia, es un sistema hídrico abastecido por un canal artificial (el canal del Dique) a través de un dispositivo de compuertas. Durante las últimas décadas, ha presentado problemas de aprovechamiento excesivo, por lo cual resulta necesario regular las estructuras hidráulicas que abastecen este cuerpo de agua, ya que desempeñan un papel importante en el manejo de los niveles, los cuales, a su vez, repercuten en la oferta hídrica. Como medida de gestión para la sostenibilidad del embalse se ha desarrollado este trabajo, en que se presenta la implementación de un modelo hidrodinámico bidimensional (modelo EFDC Explorer), así como su calibración mediante la comparación de series temporales de los niveles de agua del embalse con los resultados de las velocidades medidas y las calculadas por el modelo, durante 2 períodos climáticos distintos (secas y lluvias), para contribuir con una herramienta computacional a la explotación sostenible del Hidrosistema Canal del Dique-Embalse El Guájaro. Las comparaciones realizadas mostraron un buen comportamiento y un buen ajuste entre los valores medidos y los simulados por el modelo, basados en los resultados cuantitativos de fiabilidad (Nash-Sutcliffe). Se considera que los resultados obtenidos son bastante satisfactorios y permiten estimar condiciones para la restauración, el aprovechamiento y el uso sostenible de este sistema hídrico

© 2014 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

The hydrodynamic modelling for the water management of el Guájaro Reservoir, Colombia

A B S T R A C T

The Guájaro Reservoir in northern Colombia is a hydrosystem that is supplied by an artificial channel (Canal del Dique) through a system of floodgates. During the last decades, has been presenting problems of excessive use, which is why, it is necessary to regulate the hydraulic structures that serve this water body, as they play an important role in managing the levels that in turn affect the water supply. The present work is carried out as a sustainability management alternative of the reservoir. A two-dimensional hydrodynamic model (EFDC Explorer) and its calibration is implemented using time series of the free surface levels, and comparing the measured velocities and those estimated by the model for two different climatic periods, to assist the operation of the Hydrosystem Canal del Dique-Guájaro Reservoir sustainability. The corresponding comparisons showed a good behavior between measured and simulated data,

Keywords:

Hydrodynamic modeling
Water resource management
EFDC Explorer

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: ftorres4@cuc.edu.co (F. Torres-Bejarano).

based on the quantitative results of Nash-Sutcliffe reliability method. It is considered that the results are quite satisfactory and allows the estimation of conditions for restoration, its use, as well as the incoming and outgoing water through hydrosystem channel-reservoir.

© 2014 CIMNE (Universitat Politècnica de Catalunya). Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

Actualmente existe una preocupación generalizada por el deterioro del medio ambiente en todo el mundo. Fenómenos como el calentamiento global, provocados en gran medida por el desarrollo industrial y por el crecimiento poblacional no sostenible, hacen que resulte de suma importancia disponer de herramientas que ayuden a entender estos fenómenos y a evaluar escenarios hipotéticos en caso de situaciones de emergencia, con la finalidad de tomar decisiones precisas, ajustadas a la realidad y de forma eficaz [1].

En la resolución de los problemas relacionados con los recursos hídricos son necesarias tanto la representación espacial del sistema como la comprensión del problema. Al respecto, los modelos hidrodinámicos permiten representar las características y el comportamiento de las relaciones del sistema a partir de las capacidades analíticas predictivas correspondientes, las cuales son más útiles en la resolución del planeamiento y en la gestión de problemas complejos relacionados con los recursos acuáticos. La gestión integrada de los recursos acuáticos es hoy un prerrequisito para la preservación medioambiental y para el desarrollo económico. Sin embargo, las acciones propuestas se encuentran con dificultades de implementación por falta de datos necesarios y por el desconocimiento de las interacciones entre los componentes hidrológicos y ecológicos [2].

Según [3], está apareciendo una gran variedad de software y de tecnologías de modelación en forma de «herramientas de apoyo» que ayudan a gestionar mejor los problemas de aplicación del conocimiento científico en la investigación ambiental y en las actividades de planificación. Estas tecnologías son el resultado de las preocupaciones legítimas por aumentar la eficiencia y la rentabilidad de la investigación y garantizar que la ciencia sea eficaz y fácil de transferir a las aplicaciones de gestión, en particular a la gestión de los recursos hídricos.

La modelación de la hidrodinámica de un cuerpo de agua es un instrumento que permite obtener unos conocimientos cuantitativos puntuales. El uso de modelos numéricos para predecir los flujos hidrodinámicos proporciona información sobre variables tan relevantes como la forma de la lámina de agua, las variaciones del caudal, la elevación de la superficie libre, la presión o la concentración de contaminantes, para flujos tanto estacionarios como no estacionarios [4].

De acuerdo con lo anterior, el objetivo del presente trabajo es implementar un modelo numérico hidrodinámico para contribuir a la gestión sostenible del recurso hídrico del embalse del Guájaro, en Colombia, considerando primordialmente la gestión de los niveles del embalse.

La elección del modelo depende, en cada caso, del objetivo que se persigue, de la complejidad del problema y de la calidad de los datos disponibles para su validación y aplicación y de los resultados esperados [5]. Para este trabajo se ha seleccionado el modelo *Environmental Fluid Dynamics Code* (EFDC) por su facilidad en el preprocesamiento de datos y por su capacidad de procesamiento, su alto rendimiento computacional y su robustez numérica. Además, ha sido aplicado e implementado con éxito en diversos casos de estudio a escala mundial, y en las 2 últimas décadas se ha convertido en uno de los modelos hidrodinámicos más utilizados y técnicamente defendibles del mundo: se ha aplicado en más de 100

cuerpos de agua, así como para la gestión ambiental de los recursos hídricos [6–11].

2. Descripción del modelo

2.1. El modelo EFDC Explorer

El modelo EFDC fue desarrollado inicialmente en el *Virginia Institute of Marine Science* y posteriormente fue patrocinado por la *Environmental Protection Agency* de Estados Unidos (US EPA). El modelo EFDC tiene la capacidad de analizar la hidrodinámica de forma tridimensional, resolviendo las ecuaciones de movimiento (verticalmente hidrostáticas) y de superficie libre, junto con las ecuaciones de continuidad y de balance de masa, es decir, con módulos acoplados de salinidad, temperatura, sedimentos y transporte de contaminantes. Es un modelo adaptable a las características necesarias de los estudios sobre cuerpos de agua [12]. Se trata, pues, de un modelo hidrodinámico y de calidad del agua que puede aplicarse a cualquier cuerpo de agua superficial, incluidos los lagos y los ríos. El EFDC fue desarrollado mediante una estructura caracterizada por: a) un modelo construido con celdas de elementos finitos; b) que es posible humedecer y secar en el procesado del contorno; c) que permite el intercambio de calor con la atmósfera, y d) y también simular la calidad del agua [13]. Es un paquete de modelación hidrodinámica tridimensional multipropósito, capaz de simular una gran variedad de problemas ambientales y de transporte. Resuelve las ecuaciones de movimiento tridimensionales, de superficie libre, de presión hidrostática y de turbulencia para fluidos de densidad variable.

El modelo EFDC ha sido aplicado en el río Yangtsé, en China, con el fin de calibrar y validar el control diario de la elevación de la superficie del agua y utilizar los datos de concentración de sedimentos para simular el sedimento móvil en el lecho del río para los períodos de aguas altas [14]. También se ha demostrado la utilidad de este modelo para contribuir a la restauración ecológica de Perdido Bay, en Estados Unidos [15]; en dicho estudio se utilizó el modelo EFDC y se simuló la hidrodinámica de este estuario, junto con los parámetros de calidad de agua, salinidad, temperatura, nutrientes y oxígeno disuelto. Por su parte, Wang et al. (2013) trabajaron en el embalse Miyun, uno de los embalses más grandes de China e implementaron el EFDC para obtener una comprensión integral del patrón espaciotemporal de la calidad del agua, simulando los procesos hidrodinámicos y de depósito de algas, con el fin de estudiar los efectos de la protección y la gestión efectiva del embalse [13]. Entre otras aplicaciones importantes del EFDC, destacan la transferencia de agua para el control de la eutrofización en los lagos y la predicción de la temperatura del agua en los embalses, y también como herramienta de gestión para la restauración de la calidad del agua [16–19].

La versión EFDC Explorer 7.1 (de distribución comercial) es una herramienta completa y flexible, diseñada para el sistema de modelación EFDC, la cual fue optimizada por la empresa *Dynamic Solutions International* (DSI), que desarrolló una interfaz de usuario que facilita la implementación del modelo, desde el preprocesamiento de datos hasta el posprocesamiento de los resultados.

2.2. Ecuaciones gobernantes

El modelo desarrolla las ecuaciones de movimiento (1) y (2), la ecuación de continuidad (3), la ecuación de estado (4) y las ecuaciones de transporte para la salinidad y la temperatura (5) y (6), y las resuelve integradas en la vertical y en 3 D. El modelo utiliza coordenadas cartesianas o curvilíneas ortogonales en el plano horizontal y un sistema de coordenadas sigma en el plano vertical [20].

2.2.1. Ecuaciones de movimiento

$$\frac{\partial(mHu)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H u u)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v u)}{\partial y} + \frac{\partial(m w u)}{\partial z} - \left(m f + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H v = -m_y H \frac{\partial(g\zeta + \rho)}{\partial x} \quad (1)$$

$$-m_y \left(\frac{\partial h}{\partial x} - z \frac{\partial H}{\partial x} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) + Q_u$$

$$\frac{\partial(mHv)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H v u)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v v)}{\partial y} + \frac{\partial(m w v)}{\partial z} + \left(m f + v \frac{\partial m_y}{\partial x} - u \frac{\partial m_x}{\partial y} \right) H u = -m_x H \frac{\partial(g\zeta + \rho)}{\partial y} \quad (2)$$

$$-m_x \left(\frac{\partial h}{\partial y} - z \frac{\partial H}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_v \frac{\partial v}{\partial z} \right) + Q_v$$

En las ecuaciones (1) y (2), el término 1 representa la razón del cambio de la velocidad con respecto al tiempo; el término 2 son los componentes advectivos y representan el movimiento del fluido debido a las fuerzas inerciales; el término 3 es la aceleración de Coriolis en la curvatura y sobre las tensiones tangenciales del fondo, representada a través de la variación de la superficie libre; el término 4 es la fuerza de presión, representada a través de la variación de la superficie libre, y el termino 5, los esfuerzos viscosos que dan origen a la turbulencia dentro del flujo.

2.2.2. Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial(m\zeta)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H u)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v)}{\partial y} + \frac{\partial(m w)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

2.2.3. Ecuación de estado

$$\rho = \rho(p, S, T) \quad (4)$$

2.2.4. Ecuación de transporte para la salinidad y la temperatura

$$\frac{\partial(mHS)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H u S)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v S)}{\partial y} + \frac{\partial(m w S)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_b \frac{\partial S}{\partial z} \right) + Q_S \quad (5)$$

$$\frac{\partial(mHT)}{\partial t} + \frac{\partial(m_y H u T)}{\partial x} + \frac{\partial(m_x H v T)}{\partial y} + \frac{\partial(m w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(m \frac{1}{H} A_b \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_T \quad (6)$$

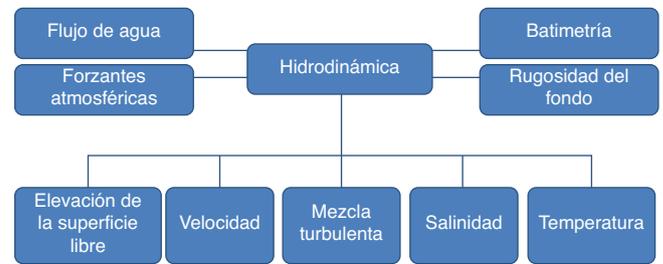


Figura 1. Estructura del modelo hidrodinámico EFDC.

donde u y v son las componentes de velocidad en las coordenadas horizontales curvilíneas-ortogonales (x e y); m_x y m_y son las raíces cuadradas de los componentes diagonales; $H = h + \zeta$ es la profundidad total, o la suma de la profundidad y la superficie libre; p es la presión física en exceso de la densidad referencial; f es el parámetro de Coriolis; A_u y A_v , A_b son los términos de la difusión vertical y de la difusión vertical turbulenta o viscosidad de Eddy; Q_u y Q_v representan las fuerzas adicionales o fuentes de impulso y sumideros, incluyendo la difusión turbulenta y el impulso horizontal, la resistencia a la vegetación y las tensiones de onda de Reynolds; ρ representa las densidades; T y S , la temperatura y la salinidad, respectivamente; Q_S y Q_T incluyen la difusión de escala horizontal de la submalla, y las fuentes y los sumideros termales, respectivamente.

La estructura del modelo hidrodinámico EFDC incluye parámetros de entrada tales como el flujo, los forzantes atmosféricos, la batimetría y los coeficientes de fricción en el fondo. Entre los distintos productos del módulo hidrodinámico se incluyen, entre otros, la elevación de la superficie libre, la velocidad, la turbulencia, la salinidad y la temperatura, tal como se ilustra en la figura 1 [21].

2.3. Solución numérica de las ecuaciones

Para resolver las ecuaciones de movimiento en el modelo EFDC se utiliza un esquema numérico de diferencias finitas de segundo orden de precisión en el espacio, sobre una malla de tipo Staggered Cell o MAC. La integración temporal del modelo sigue un esquema de diferencias finitas de segundo orden, con un procedimiento de división interna-externa para separar el modo baroclínico de la onda de gravedad de la superficie libre externa, o modo barotrópico. El modo de solución externo es semiimplícito y calcula simultáneamente el campo bidimensional de elevación de la superficie mediante un procedimiento de gradiente conjugado preacondicionado. La solución externa se completa con el cálculo de las velocidades barotrópicas promediadas en la profundidad, utilizando el nuevo campo de elevación de la superficie. La solución externa semiimplícita del modelo permite grandes incrementos de tiempo, que se ven limitados únicamente por criterios de estabilidad del esquema explícito de advección en diferencias centradas o el esquema viento arriba, utilizado para las aceleraciones no lineales [16,17,20]. Las condiciones de frontera horizontales para el modo de solución externo ofrecen opciones para especificar de manera simultánea la elevación de la superficie libre directamente, la característica de una onda entrante, la radiación libre de una onda de salida o el flujo volumétrico normal sobre porciones arbitrarias de la frontera.

El modelo EFDC implementa un esquema de solución de conservación de la masa de pasos fraccionados de segundo orden en el espacio y en el tiempo para las ecuaciones de transporte eulerianas, en el mismo paso de tiempo o 2 veces el paso de tiempo de la solución de la ecuación de movimiento. El paso advectivo de la solución de transporte utiliza el esquema de diferencias centradas utilizado en el modelo de Blumberg-Mellor o bien un esquema de diferencias jerárquico viento arriba [16,21]. El paso de difusión horizontal

es explícito en el tiempo, mientras que la etapa de difusión vertical es implícita.

3. Metodología

En este estudio se ha desarrollado una metodología que incluye la implementación del modelo numérico EFDC, versión EFDC Explorer 7.1, para las simulaciones de variables hidrodinámicas en el embalse del Guájaro. Además, para la calibración del modelo se han comparado los niveles medidos diariamente en el embalse y los simulados por el modelo, y se ha utilizado un método estadístico para evaluar la capacidad predictiva del modelo [22] y un indicador de la bondad de ajuste, como es el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe [23].

Entre los procedimientos que se han seguido cabe señalar las mediciones de la hidrodinámica del embalse, para las cuales se utilizó un perfilador acústico de corrientes Doppler (ADCP), marca RD-I, con un rango de frecuencia de 600 kHz, que registraba continuamente la magnitud y la dirección de las velocidades del agua. Las profundidades fueron determinadas mediante una ecosonda batimétrica GPSMAP 441s, marca Garmin. Para los datos hidrometeorológicos se utilizó la información obtenida de las estaciones de medición y control del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), mediante el sistema de recepción por satélite IDEAM Hydras3.

3.1. Descripción de la zona de estudio

El embalse del Guájaro se considera una ecorregión estratégica, situada al norte de Colombia (fig. 2), en las coordenadas 10° 42' N y 75° 6' W, a pocos kilómetros del mar del Caribe. Este cuerpo de agua tiene una extensión de 16.000 ha, un volumen de 400 millones metros cúbicos y un volumen útil de 230 millones metros cúbicos; drena 12.000 ha por medio de un distrito de riego y drenaje (los distritos de riego son superficies de tierra destinadas para el cultivo, donde se ejecutan proyectos de irrigación), y cuenta con 2 sistemas de compuertas que lo comunican con el canal del Dique, lo cual permite controlar los niveles del embalse. En la actualidad las compuertas siguen un protocolo de actuación cuyo objetivo es determinar las acciones que hay que realizar en función del ciclo hidrológico que se presente.

3.2. Calibración del modelo

El objetivo de la calibración del modelo es reproducir el movimiento de la masa de agua en situaciones conocidas mediante la variación de los parámetros físicos dentro de unos valores racionalmente adecuados [22,23]. Para calibrar el modelo, se simuló 15 días en total para los 2 escenarios de simulación. La altura de rugosidad del fondo (Z_0) se estableció como un valor típico de 0,02 m; las constantes de viscosidad horizontal adimensional de Smagorinsky, en 0,25; el intervalo de paso del tiempo utilizado en las corridas fue de 2 s, y se generaban resultados cada 2 h.

Existen muchas aplicaciones de modelación hidrodinámica en 2 D y en 3 D en lagos, en que se ha utilizado satisfactoriamente la comparación de niveles para indicar la capacidad de los modelos de representar la hidrodinámica de los sistemas hídricos naturales. Algunos casos destacables son [16,21,24,25]. Por todo lo anterior, para la calibración se han utilizado, en este trabajo, las cotas de elevación y el área correspondiente a la cota máxima en el período de estudio, y se han especificado los caudales de salida y de entrada del embalse para las épocas secas y de lluvias, respectivamente.

Se ha realizado un análisis estadístico entre las elevaciones de la superficie predichas y las observadas en ambos períodos simulados. Para determinar el ajuste y la bondad del ajuste se han utilizado la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de eficiencia (C_{ef}) de Nash-Sutcliffe. El error en las predicciones del modelo se cuantifica en términos de las unidades de la variable calculada mediante la RMSE, la cual se expresa en la ecuación (7), seguida del coeficiente de eficiencia utilizando la ecuación (8).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2}{N}} \tag{7}$$

$$C_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \tag{8}$$

donde O_i y p_i son los niveles del embalse medidos y calculados, respectivamente; N es el número de la muestra en las series



Figura 2. Ubicación de la zona de estudio.

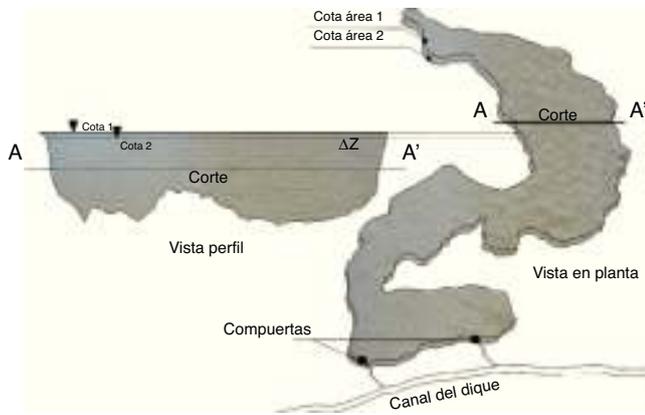


Figura 3. Identificación de cotas de área y su diferencial.

temporales, y \bar{O}_i corresponde al valor de la media temporal de los niveles medidos del embalse.

La validación supone la evaluación de la capacidad predictiva del modelo. Ello implica contrastar los resultados del modelo con los datos observados y ajustar los parámetros hasta que los resultados estén dentro de unos límites de precisión aceptables [22,23,26].

3.2.1. Accionamiento de las compuertas para calibrar el modelo

El embalse del Guájaro ha de ser accionado por medio de compuertas hidráulicas para asegurar la oferta hídrica, la cual no puede garantizarse únicamente con la oferta que suministra su cuenca hidrográfica. La conexión del canal del Dique y El Guájaro se realiza mediante 2 sistemas de compuertas, conocidas como la compuerta del Limón y la de Villa Rosa (fig. 3).

En un estudio previo [27] se calcularon los caudales de entrada y salida de flujo cuando las compuertas estaban abiertas, y se obtuvieron las curvas de rendimiento que permiten estimar el caudal de entrada o de salida de las compuertas en función de la elevación del nivel del agua en el embalse del Guájaro y en el canal del Dique. Sin embargo, puesto que no se tuvieron en cuenta los aforos

líquidos y sólidos para calibrar los parámetros de las compuertas y la entrada a los tajos (*culverts*), los caudales estimados fueron teóricos (figs. 4–6).

En este trabajo, para calibrar el modelo EFDC se han utilizado inicialmente los caudales teóricos estimados a partir de la diferencia de los niveles de agua y la superficie del embalse correspondiente a cada nivel. Con estos valores se han efectuado ensayos secuenciales mediante la modificación de este parámetro hidráulico. Dado que la estructura es principalmente un vertedero con contracción regular, se ha seleccionado la fórmula de vertedor de cresta presentada en la ecuación (9) para recalcular los caudales de entrada y salida entre los 2 sistemas cuando se abren las compuertas.

$$Q = cb\sqrt{2g}H^{3/2} \tag{9}$$

donde Q (m^3/s) es el caudal total a través de la estructura hidráulica y b (m) es la anchura del vertedero rectangular bajo una columna de H (m). El parámetro c en esta fórmula es el coeficiente de descarga de la presa, el cual se determinó por calibración, y así se obtuvieron los caudales de entrada y salida de flujo que reflejaban un mejor ajuste del modelo.

Asimismo, en la calibración del modelo EFDC se utilizaron los datos obtenidos en las 2 campañas de medición realizadas, una en período seco, en julio de 2013, y la otra en período lluvioso, en octubre de 2013, y a partir de estos datos se establecieron los escenarios de simulación. La aplicación del modelo ha permitido conocer el volumen de agua que entra y sale del embalse a través de las compuertas (El Limón y Villa Rosa) durante los 2 períodos climáticos característicos de ocurrencia, de secas y de lluvias, cuya evolución gráfica puede verse en las figuras 7–9, respectivamente.

En este sentido, la implementación realizada en este trabajo contribuye a la gestión del embalse del Guájaro, puesto que no solo permite conocer los caudales de entrada y salida a través de las compuertas, sino también los niveles que alcanza el embalse y los tiempos en que se dan esos niveles para diferentes épocas y condiciones climáticas, lo cual permite proponer acciones para garantizar la apertura y el cierre oportunos de las compuertas del embalse, de acuerdo con los protocolos de accionamiento de las compuertas.

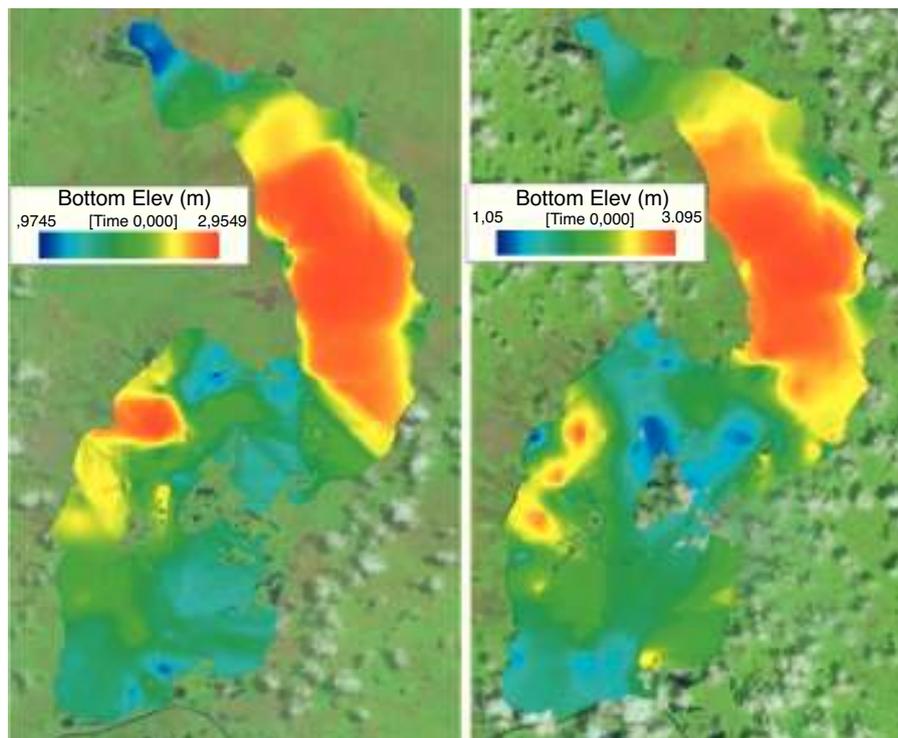


Figura 4. Batimetría del embalse El Guájaro para las 2 épocas: secas (izquierda) y lluvias (derecha).

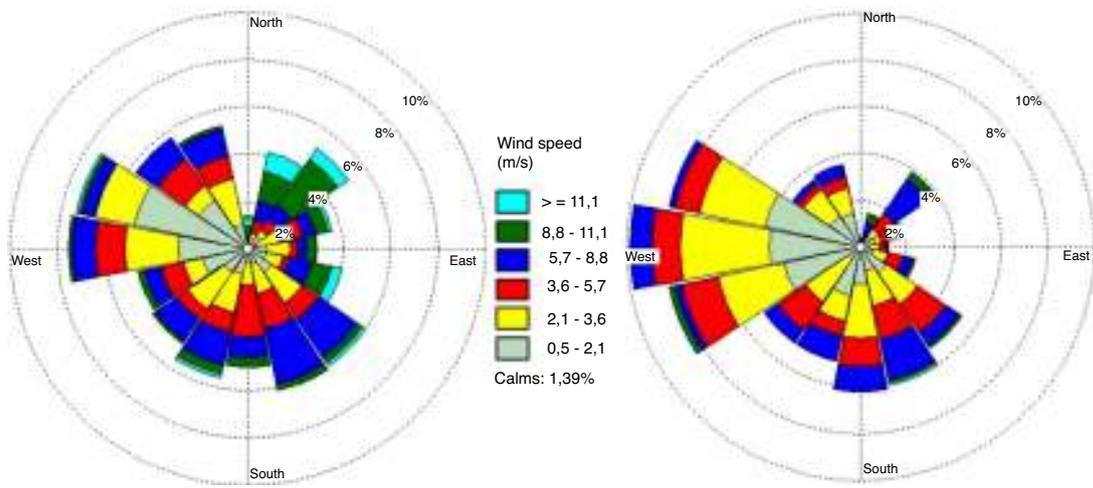


Figura 5. Rosa de vientos. Periodo de secas (izquierda). Periodo de lluvias (derecha).

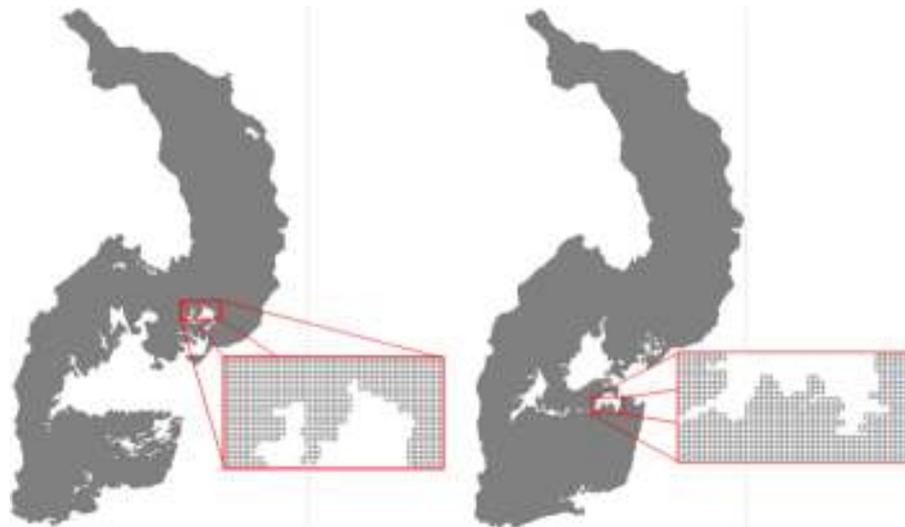


Figura 6. Malla computacional para época de secas (izquierda) y lluvias (derecha).

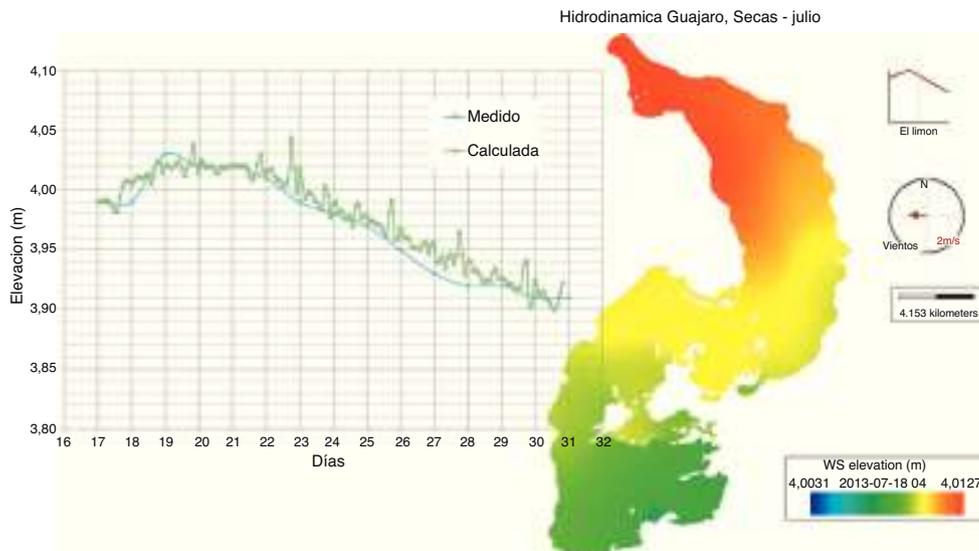


Figura 7. Comportamiento de los niveles medidos y simulados del embalse para periodo en secas.

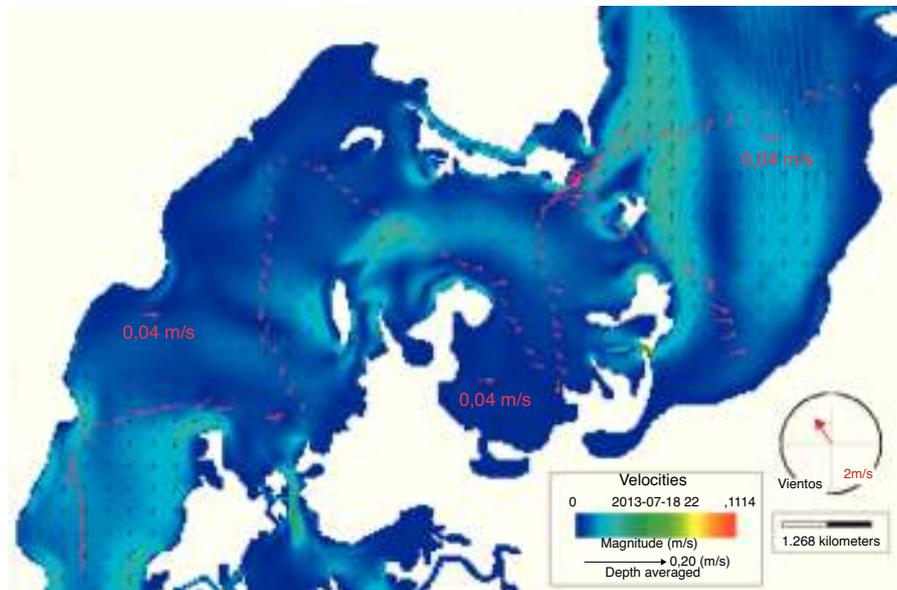


Figura 8. Simulación y valores de medidas de velocidades en el embalse, periodo de secas.

Además, en la actualidad resulta necesario controlar el accionamiento de estas estructuras de regulación, pues desempeñan un papel preponderante en la gestión de los niveles del embalse, con distintos fines: de oferta hídrica que garantice su uso en el sector agropecuario, para abastecimiento y para fines ambientales, garantizando la sostenibilidad de este sistema hídrico [28].

Es importante señalar que la validación de un modelo en aplicaciones en cuerpos de agua de gran tamaño es bastante compleja porque, a diferencia de las aplicaciones controladas en el laboratorio, los aparatos y los mecanismos de medición no son consistentes y conllevan un cierto grado de aproximación. A ello hay que añadir el factor humano, ya que la interpretación y la apreciación introducen un elemento adicional de incertidumbre [29].

3.3. Requerimientos de datos

Para la configuración y la implementación del modelo se requirió un conjunto de datos para especificar las condiciones de contorno o de entrada al modelo y así poder realizar las correspondientes simulaciones con la finalidad de validar el modelo para la zona de estudio. Todos los datos obtenidos por los equipos de medición y muestreo fueron procesados y digitalizados en archivos .shp y representados en mapas temáticos, de acuerdo con la proyección World Geodetic System (WGS) 1984 18N.

3.3.1. Velocidades del agua

Se tomaron mediciones de la magnitud y la dirección de las corrientes, así como de las profundidades en toda la superficie del embalse del Guájaro. Las mediciones se efectuaron desde una lancha, realizando transectos de orilla a orilla sobre todo el embalse (fig. 2) mediante desplazamientos a una velocidad aproximada de 5 km/h, con el fin de evitar las interferencias generadas por la velocidad de desplazamiento de la lancha.

Las velocidades medidas con el perfilador acústico de corrientes fueron objeto de un posprocesamiento, que consistió en una labor de filtrado y extracción de los valores requeridos, así como de su promedio en la vertical (columna de agua). Cabe señalar que fue necesario obtener los contornos digitalizados del embalse para las fechas correspondientes. Para ello se utilizaron imágenes de satélite de las fechas de muestreo, facilitadas por el Servicio Geológico de Estados Unidos <<http://glovis.usgs.gov/>>.

3.3.2. Batimetría y niveles

La información sobre las profundidades se obtuvo en las campañas de medición realizadas los días 18, 19 y 20 de julio de 2013 para la época de secas, y los días 27, 28 y 29 de octubre del mismo año para la época de lluvias. En la figura 4 se muestra de forma gráfica el rango de profundidades del embalse en las 2 épocas escogidas, para un área aproximada de 12.500 ha.

Los datos correspondientes a los niveles del embalse se extrajeron de los registros de mediciones diarias que lleva a cabo la entidad encargada de las cuestiones medioambientales de la región, la Corporación Autónoma del Atlántico (CRA). Estos datos fueron comparados con las series temporales obtenidas del modelo numérico, como se muestra en las figuras 7 y 9.

3.3.3. Condiciones atmosféricas

Se especificaron la condición inicial y los parámetros meteorológicos relacionados con el balance de calor en la interfase agua-aire del embalse. Se utilizaron como condiciones y forzantes atmosféricos en el modelo registros diarios de la temperatura del aire, la humedad relativa, las precipitaciones, la evaporación, la velocidad del viento y la radiación solar. Para estimar los efectos del viento sobre la superficie libre, las magnitudes y la dirección, se tomaron los datos registrados por la estación meteorológica del Instituto Meteorológico y Estudios Ambientales (IDEAM) situada en la zona de estudio. La figura 5 muestra los promedios diarios de la velocidad del viento y su dirección predominante en las épocas de secas y de lluvias.

4. Resultados y discusión

En esta sección, se presentan los resultados del modelo para la variación de los niveles del embalse en los 2 períodos simulados y se comparan con los niveles medidos en las fechas correspondientes a la realización de las campañas de medición. Asimismo se presentan, en planos horizontales, los campos de velocidad promediados en la vertical, incluyendo los vectores de velocidad medidos durante los recorridos realizados, con el fin de establecer una comparación entre las velocidades medidas y las simuladas. Para estimar los valores de las velocidades en las figuras 8 y 10, se utiliza el vector de referencia.

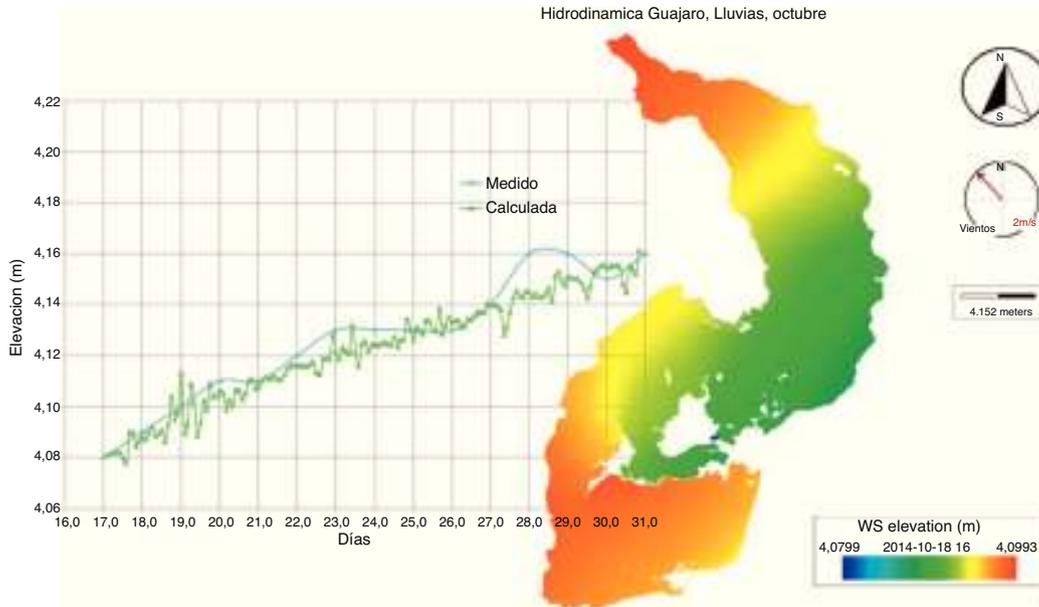


Figura 9. Comportamiento de los niveles medidos y simulados del embalse para periodo de lluvias.

4.1. Configuración de la malla computacional

Para este trabajo, se ha utilizado una malla con $\Delta X = \Delta Y = 30$ m, con 320 elementos en la dirección horizontal y 600 en la dirección vertical, para un total de 201.736 elementos, 84.589 de los cuales son celdas activas, en período de secas, y 334 elementos en la dirección horizontal y 600 en la dirección vertical, para un total de 201.736 elementos, con 84.594 celdas activas, en período de lluvias (fig. 6).

4.2. Simulaciones en período de secas

Las mediciones reportadas para este período climatológico muestran que el embalse del Guájaro alcanzó un nivel máximo de 4,03 msnm y, de acuerdo con el balance hidrológico de este cuerpo de agua, los niveles del embalse alcanzaron un nivel mínimo de 3,91 msnm. Esta variación de los niveles del embalse se muestra en

la figura 7. Asimismo, se ilustra el comportamiento de los niveles del embalse obtenido con el modelo numérico aplicado.

Con respecto a las velocidades del cuerpo de agua, los resultados de los vectores resultantes promediados en la vertical fueron comparados con los obtenidos por el modelo numérico. En la figura 8 se muestra la comparación de vectores de velocidad medidos (en rojo) y calculados (en negro), y se observa un comportamiento aceptable, tanto en cuanto a la magnitud como en cuanto a la dirección.

4.3. Simulaciones en período de lluvias

Los valores de elevación medidos sobre la superficie libre, correspondientes al período de la simulación, muestran que el embalse del Guájaro presentaba una altura de 4,08 msnm y, de acuerdo con las operaciones de apertura de las compuertas para controlar los niveles del embalse, este parámetro alcanzó una altura de 4,16 msnm. Esta variación de los niveles del embalse se muestra

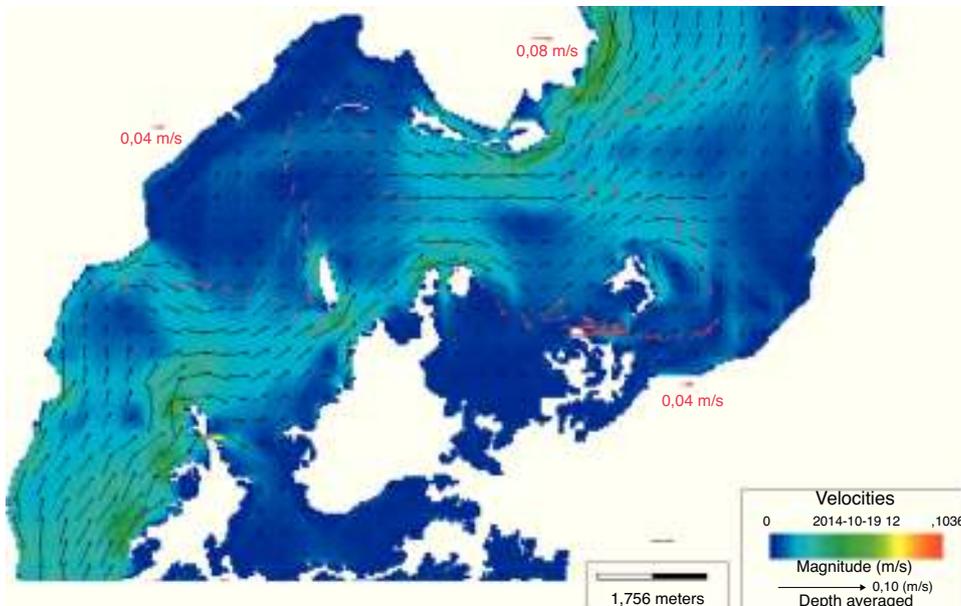


Figura 10. Simulación y valores de medidos de velocidades en el embalse, periodo de lluvias.

en la [figura 9](#). Asimismo, se ilustra el comportamiento de los niveles del embalse obtenido con el modelo numérico aplicado.

En la [figura 10](#) se presentan los vectores de velocidad medidos y calculados para la época de lluvias. Para este período también se obtuvo un comportamiento que se corresponde con lo medido *in situ*.

4.4. Resultados de la calibración

En este trabajo, se han evaluado los resultados del modelo EFDC Explorer utilizando las técnicas estadísticas (RMSE y C_{ef}) para comprobar si los resultados predichos (simulados) de los niveles de agua fueron consistentes y acordes con los valores observados para el período de secas (RMSE = 0,016 y C_{ef} = 0,87263) y para el período de lluvias (RMSE = 0,018 y C_{ef} = 0,92709). Esto muestra una excelente correlación y ajuste entre lo simulado y observado *in situ* [22], es decir, los resultados del modelo son consistentes con las mediciones.

Los resultados de la modelación muestran, en general, una cierta concordancia con las mediciones. El modelo reproduce bastante bien las características principales de la circulación forzada por el viento en el embalse del Guájaro. Además, los resultados indican que los afluentes de entrada y salida (arroyos de la subcuenca, captaciones de acueductos y zonas agrícolas, etc.) juegan un papel menos importante en el comportamiento hidrodinámico del embalse, mientras que el viento afecta fuertemente los campos de velocidad y los patrones de circulación.

5. Conclusiones

Este trabajo presenta la implementación del modelo hidrodinámico y de calidad de agua EFDC Explorer en el embalse del Guájaro. El proceso de calibración del modelo se llevó a cabo comparando las mediciones de los niveles de agua realizadas en las épocas de secas y lluvias con los datos arrojados por el modelo. Los estimadores de la bondad de ajuste (C_{ef}) y el error de la RMSE han permitido estimar, de una forma apropiada, la capacidad que tiene el modelo para reproducir los datos.

El modelo se ha aplicado al estudio del intercambio de flujo a través de las estructuras hidráulicas (compuertas) que controlan los niveles de este cuerpo de agua, cuya operación y gestión permiten la entrada y la salida del agua en un intercambio entre el sistema hídrico del canal del Dique y del embalse del Guájaro. En el período seco el embalse presenta sus niveles más bajos, lo cual obliga a tomar medidas de control para contrarrestar el déficit en volumen de agua, mientras que en los períodos lluviosos presenta niveles moderadamente altos, y ello obliga a tomar medidas para controlar el exceso en volumen y nivel de agua. Atendiendo estas condiciones, el modelo propuesto fue calibrado y validado tanto para el período de secas como para el de lluvias, y se puso a prueba la capacidad para simular estos 2 escenarios climatológicos.

Vistos los resultados satisfactorios obtenidos mediante la implementación del módulo hidrodinámico del modelo, este puede ser implementado para estimar las elevaciones y los niveles que puede presentar el cuerpo de agua, en función de los factores climáticos de ocurrencia. Asimismo, mediante simulaciones en diferentes escenarios se demuestra que la modelación hidrodinámica en este cuerpo de agua contribuye a la toma de decisiones de gestión de este recurso hídrico.

Este proceso también se ha utilizado para ajustar el modelo, y así determinar el gasto o caudal que fluye a través de las compuertas, y para analizar la hidrodinámica general de este tipo de sistemas hídricos. A partir de los resultados de la modelación hidrodinámica puede optimizarse el accionamiento de la estructura hidráulica de las compuertas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de la Costa - CUC el apoyo que les ha brindado, tanto en los aspectos logísticos como en los financieros, sin el cual habría sido imposible desarrollar este proyecto. Asimismo, agradecen al personal de Dynamic Solutions International (DSI) que les haya otorgado la licencia académica del modelo EFDC Explorer 7.1, lo cual les ha permitido realizar las simulaciones y obtener los resultados que se han presentado aquí.

Bibliografía

- [1] F. Torres-Bejarano, H. Ramirez, R. Denzer, S. Frysinger, T. Hell, S. Schlobinski, Linking numerical water quality models in an environmental information system for integrated environmental assessments, *JEP, J. Environ. Prot.* 4 (2013) 126–137.
- [2] E. Dimitriou, I. Zacharias, Quantifying the rainfall-water level fluctuation process in a geologically complex Lake catchment, *Environ. Monit. Assess.* 119 (1-3) (2006) 491–506.
- [3] B.S. McIntosh, R.A.F. Seaton, P. Jeffrey, Tools to think with? Towards understanding the use of computer-based support tools in policy relevant research, *Environ. Model. Softw.* 22 (2007) 640–648.
- [4] J. Murillo, P. Brufau, P. García-Navarro, M.A.A. Rodríguez, Aplicación del modelo bidimensional GUAD-2D para la determinación de zonas inundables en el T. M. de Fraga (Huesca), Universidad de Zaragoza e INCLAM, S.A., 2008.
- [5] I. Hillmer, Y. Niño, Modelación de fenómenos hidrodinámicos que afectan la calidad del agua en lagos, Congreso Chileno de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Tomo 1, Antofagasta, 2002.
- [6] A.Y. Kuo, J. Shen, J.M. Hamrick, The effect of acceleration on bottom shear stress in tidal estuaries, *ASCE J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 122 (1996) 75–83.
- [7] S.C. Kim, D.L. Wright, J.P.Y. Maa, J. Shen, Morphodynamic Responses to Extratropical Meteorological Forcing on the Inner Shelf of the Middle Atlantic Bight: Wind Wave, Currents, and Suspended Sediment Transport, en: M.L. Spaulding, A.F. Blumberg (Eds.), *Estuarine and Coastal Modeling V*, ASCE, New York, 1998, pp. 456–466.
- [8] M.Z. Moustafa, J.M. Hamrick, Calibration of the wetland hydrodynamic model to the Everglades Nutrient Removal Project, *Water Qual. Ecosys. Model.* 1 (2000) 141–167.
- [9] Z.G. Ji, M.R. Morton, J.M. Hamrick, Wetting and drying simulation of estuarine recesses, *Estuar. Coast. Shelf S.* 53 (2001) 683–700.
- [10] K. Park, H.S. Jung, H.S. Kim, S.M. Ahn, Three-Dimensional Hydrodynamic Eutrophication Model (HEM-3D): Application to Kwang-Yang Bay, Korea, *Mar. Environ. Res.* 60 (2005) 171–193.
- [11] F. Luo, R.J. Li, 3D water environment simulation for North Jiangsu offshore sea based on EFDC, *J. Water Resour. Prot.* 1 (2009) 41–47.
- [12] J.M. Hamrick, A three-dimensional environmental fluid dynamic computer code: Theoretical and computational aspects, *The College of William and Mary, Virginia Institute of Marine Science*, 1992, pp. 317, Special report.
- [13] Y. Wang, Y. Jiang, W. Liao, P. Gao, X. Huang, H. Wang, et al., 3-D hydro-environmental simulation of Miyun reservoir, Beijing, *J. Hydro-environ. Res., English* (2013) 1–13, in press.
- [14] Q. Jun, Y. Zhifeng, S. Zhenyao, Three-dimensional modeling of sediment transport in the Wuhan catchments of the Yangtze River, *The 18th Biennial Conference of International Society for Ecological Modelling, Procedia Environ. Sci.* 13 (2012) 2437–2444.
- [15] M. Xia, P.M. Craig, C.M. Wallen, A. Stoddard, J.M. Poulsen, M. Peng, et al., Numerical simulation of salinity and dissolved oxygen at Perdido Bay and adjacent coastal ocean, *J. Coastal Res.* 27 (1) (2011) 73–86.
- [16] Y. Li, K. Acharya, Z. Yu, Modeling impacts of Yangtze River Water Transfer on Water Ages in Lake Taihu, China, *Ecol. Eng.* 37 (2) (2011) 325–335.
- [17] G. Wu, Z. Xu, Prediction of Algal Blooming Using EFDC Model: Case study in the Daoxiang Lake, *Ecol. Model.* 222 (6) (2011) 1245–1252.
- [18] G. He, H. Fang, S. Bai, X. Liu, M. Chen, J. Bai, Application of a three-dimensional eutrophication model for the Beijing Guanting Reservoir, China, *Ecol. Model.* 222 (8) (2011) 1491–1501.
- [19] M. Yang, L. Li, J. Li, Prediction of Water temperature in stratified reservoir and effects on downstream irrigation area: A case study of Xiaohushan reservoir, *Phys. Chem. Earth.* (2012) 38–42.
- [20] P.M. Craig, EFDC-DS/EFDC-Explorer User Manual: 3D Hydrodynamic and Water Quality Modeling System, Dynamic Solutions International, LLC, Knoxville, TN., 2005, pp. 1–10.
- [21] S. Jeong, K. Yeon, Y. Hur, K. Oh, Salinity intrusion characteristics analysis using EFDC model in the downstream of Geum River, *J. Environ. Sci.* 22 (6) (2010) 934–939.
- [22] P. Molnar, Calibration. *Watershed Modelling*, Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH, Zürich, Switzerland, 2011.
- [23] J.E. Nash, J.V. Sutcliffe, River flow forecasting through conceptual models, part I: A discussion of principles, *J. Hydrol. Hydrology* 10 (1970) 282–290.
- [24] J. Lee, A. Qian, Three-Dimensional Modeling of Hydrodynamic and Flushing in Deep Bay, *International Conference on Estuaries and Coasts*, Hangzhou, China, 2003.

- [25] X. Ye, Q. Zhang, L. Bai, Q. Hu, A modeling study of catchment discharge to Poyang Lake under future climate in China, *Quatern. Int.* 244 (2011) 221–229.
- [26] C. Palacio, F. García, U. García, Calibración de un modelo hidrodinámico 2 D para la Bahía de Cartagena, *DYNA* 164 (77) (2010) 152–166.
- [27] Universidad del Norte, Embalse del Guájaró. Diagnóstico hidráulico y ambiental de las condiciones actuales, Uninorte, Gobernación del Atlántico, Secretaría de Agua Potable y Saneamiento Básico, Barranquilla, 2009.
- [28] CRA-UNIMAGDALENA, Actualización del manual de operaciones del hidrosistema al cual pertenece el embalse el Guájaró y llevar a cabo el diseño de las estructuras y sistemas para disminuir la vulnerabilidad de la zona ante eventos climatológicos extremos, Universidad del Magdalena, 2012.
- [29] H. Ramírez-León, C. Couder-Castañeda, I.E. Herrera-Díaz, H.A. Barrios-Piña, Modelación numérica de la descarga térmica de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde, *Rev. Int. Métodos Numér. Cál. Diseño Ing.* 29 (2) (2013) 114–121.