

## METODOLOGÍA PARA LA VALIDACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO ESPECÍFICO EN ÁREAS INTERMAREALES

**Carlos Alberto Palacio<sup>1</sup> y Mauricio Toro<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental,  
Universidad de Antioquia, Medellín*

*<sup>2</sup> Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente  
Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín  
cpalacio@udea.edu.co*

Recibido para evaluación: 2 Septiembre de 2002 / Aceptación: 13 de Noviembre de 2002 / Recibida versión final: 2 de Diciembre de 2002

### RESUMEN

Se propone en este artículo un procedimiento sistemático para la validación de un modelo hidrodinámico aplicado a regiones costeras en donde la marea es el fenómeno predominante. Se plantea un análisis de las variaciones de los parámetros del modelo a calibrar más relevantes utilizando como criterio el parámetro estadístico “rms” de los residuos entre los resultados del modelo y los datos medidos. Este parámetro se evalúa para la velocidad integrada en la profundidad en unas estaciones de medida y el caudal total en una sección determinada, para seleccionar la configuración del parámetro que produce el valor mínimo en la curva parámetro “rms” vs. Variación en el parámetro a calibrar, en todo el dominio de estudio.

**PALABRAS CLAVES:** Modelos Hidrodinámicos Costeros, Análisis de Sensibilidad, Calibración, Validación.

### ABSTRACT

In this paper, a systematic methodology for the calibration and validation of a hydrodynamic model for coastal areas where the tidal motion is dominant is presented. The methodology states an analysis of the variation of the model parameters to be calibrated in terms of the statistical parameter root mean square (rms) evaluated for the deviations between the model results and the field measurements. The rms parameter is evaluated for the depth integrated velocity in a series of gauge stations and the discharges at selected cross sections in the domain. The model parameters are varied in such a way that a minimum value in the curve of rms vs. the calibration parameter is obtained.

**KEYWORDS:** Coastal Hydrodynamic Model, Sensitivity Analysis, Calibration, Validation.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la literatura reciente no se encuentra un procedimiento general y sistemático para la validación de modelos en regiones costeras, lo que hace que el desarrollo y la aplicación de éstos sean el producto de la experiencia del investigador o de un proceso de corrección mediante el uso de información de campo. El objetivo de este artículo es dar un paso en esta dirección al plantear un procedimiento para la validación de modelos hidrodinámicos en regiones costeras en donde el efecto de la marea juega un papel predominante. Se plantea un análisis de las variaciones de los parámetros de calibración más relevantes en el modelo computacional, utilizando como criterio de calidad de la calibración el estadístico “rms” de los residuos entre los resultados del modelo y los datos medidos, en función de la velocidad integrada en la profundidad y del caudal total. Esta metodología fue aplicada a un modelo hidrodinámico para la bahía de Meldorf en la costa del Mar del Norte alemán obteniéndose resultados satisfactorios (Palacio, 2002).

Los pasos y el orden aquí recomendados a seguir en la validación de un modelo específico son:

1. Verificación conceptual del modelo; 2. Definición de las condiciones de borde en las fronteras abiertas; 3. Calibración del modelo con respecto a la batimetría; 4. Calibración del modelo con respecto a la rugosidad del fondo; y 5. Validación del modelo.

Inicialmente se darán algunas definiciones relacionadas con la metodología de calibración y validación de modelos numéricos, ya que la terminología utilizada en modelos de costas no es generalmente aceptada en todos los campos de la ingeniería. Se empleará la terminología adoptada por “American Society of Civil Engineers’ ASCE Task Committee on 3D Free Surface Hydrodynamic Model Verification” (Toro, 1994) e implementada en los principales institutos de ingeniería e investigaciones hidráulicas en Europa (IAHR Bulletin, 1994 y Dee, 1995).

## 2. DEFINICIONES Y CONCEPTOS IMPORTANTES

A continuación se presenta una serie de definiciones relacionadas con los conceptos de modelo, validación y verificación de modelos.

### 2.1 Modelo computacional

Se define “modelo” como una imagen o abstracción de la realidad, una descripción o presentación física o matemática de un sistema natural (Sage, 1987). Esta definición se puede particularizar a modelos computacionales, los cuales se definen como la implementación, en un computador, de un modelo cuya función principal es representar un sistema natural, y predecir ciertos aspectos del comportamiento de este sistema bajo distintas condiciones (Dee, 1995). La implementación de un modelo computacional incluye los siguientes pasos (Toro, 1994; Dee, 1995):

\* **Definición del sistema natural:** considera la descripción de una serie de fenómenos físicos, químicos o biológicos relevantes para los propósitos del modelo, que se deben considerar en el sistema.

\* **Definición del modelo conceptual:** es una representación matemática, lógica o verbal de un sistema o proceso natural.

\* **Implementación del algoritmo:** es la conversión de un modelo conceptual en un conjunto de reglas o procedimientos apropiados para el cálculo.

\* **Implementación del software:** es la conversión del algoritmo implementado en código de computador.

Estos pasos se siguen en secuencia y en cada paso se pierde información, por lo que la necesidad de validación de un modelo computacional es obvia.

### 2.2 Validación del modelo computacional

Antes de enumerar los pasos seguidos durante la validación del modelo computacional, se presenta la siguiente definición de la palabra validación (Dee, 1995):

*“La validación de un modelo computacional es el proceso de formular y documentar acerca de la aplicabilidad y precisión de los resultados computacionales del modelo en relación con los propósitos de éste y del sistema natural que representa”*

Teniendo en cuenta esta definición, en la validación de un modelo computacional se deben seguir dos pasos: la verificación básica y la validación funcional.

### 2.2.1. Verificación básica

Se define verificación como el proceso de probar si el modelo matemático, el algoritmo de solución numérica y el código computacional son correctos (Toro, 1994; GESAMP, 1991). La verificación básica debe llevarse a cabo en paralelo con el desarrollo y la implementación del modelo y considera los siguientes pasos secuenciales:

\* **Verificación del software.** Se busca en este paso probar que el código de computador calcula con precisión lo que está formulado en la implementación del algoritmo, sin importar el significado físico de los resultados. El propósito es probar la lógica interna del código, los parámetros del software, analizar la estructura interna de los datos, etc. (Toro, 1994).

\* **Verificación del algoritmo.** En este segundo paso se busca establecer la precisión del algoritmo implementado para el modelo conceptual. Los resultados de esta verificación incluyen estimativos de las diferencias entre el modelo conceptual y su versión implementada en el código de computador. La verificación del algoritmo debe incluir, entre otros, los siguientes temas: consistencia con respecto al modelo conceptual; estabilidad, convergencia, precisión y conservación de las propiedades de los métodos numéricos, etc. Para realizar este paso, la literatura ofrece diversas técnicas, una de las cuales es la "PSF" (Prescribed Solution Forcing Technique). El lector se remite a Toro (1994) para una descripción detallada de esta técnica.

\* **Verificación conceptual.** En este último paso se busca entender el comportamiento, la aplicabilidad y precisión del modelo. El resultado de esta actividad es la habilidad de determinar si el modelo conceptual es apropiado para una aplicación dada. La verificación conceptual debe considerar, entre otras, las siguientes actividades: verificación del comportamiento integral del modelo simulado, verificación de las propiedades locales del sistema, análisis de sensibilidad con respecto a los parámetros del sistema, etc.

### 2.2.2. Validación funcional

El procedimiento a seguir en esta etapa depende de si el modelo computacional es genérico o específico. El modelo genérico es un modelo diseñado para la simulación de una variedad de sistemas naturales que son similares en

término de los procesos físicos, químicos o biológicos dominantes (Dee, 1995). El modelo específico es un modelo dedicado a un sitio o situación específica, generalmente derivados de componentes de modelos genéricos combinados con información específica, tal como topografía u otros datos geométricos, parámetros empíricos y condiciones de borde (Dee, 1995).

En los modelos específicos se deben realizar dos pasos adicionales antes de realizar la validación funcional: la validación de los datos de campo y la calibración del modelo computacional (Dee, 1995). La validación de los datos de campo consiste en chequeos de consistencia de los datos re-colectados mediante el análisis de los estadísticos descriptivos. La calibración del modelo es el proceso por el cual los parámetros físicos del modelo se "ajustan", dentro de límites físicamente aceptables, para asegurar que el modelo representa el caso de estudio específico con precisión (Gerritsen et al., 1995). Los "ajustes" de los valores de los coeficientes deben ser físicamente respaldados ya que la calibración del modelo es la preparación de éste para el uso de manera predictiva (Palacio, 2002). Una vez se realizan estos dos pasos (validación de los datos de campo y calibración del modelo computacional) se procede con la validación funcional (de acá en adelante el procedimiento es igual tanto para modelos genéricos como específicos).

Se procede, entonces a la realización de una serie de experimentos computacionales para probar el modelo como un todo en vez de buscar errores aislados. Los resultados del modelo computacional se deben comparar con información experimental o de campo. La naturaleza de las mediciones (qué es medido y cómo se hicieron las mediciones) y la calidad de las mediciones (precisión) son dos de los factores más importantes que se deben tener en cuenta.

Un paso que debe hacerse con gran cuidado antes de la validación del modelo específico es la implementación del modelo computacional en el área de estudio. Para ello se requiere de una adecuada información de campo como: batimetría, topografía, niveles de superficie libre, mediciones de corriente e información de viento y presión atmosférica. Las etapas a seguir en la implementación del modelo computacional secuencialmente son: definición del dominio computacional, definición de la malla computacional, implementación de la batimetría del modelo e implementación de las condiciones de borde. De los pasos de la validación descritos anteriormente, el

presente artículo se centrará en la verificación conceptual y en la validación funcional en modelos específicos. Para la verificación conceptual se hace énfasis en el comportamiento integral del modelo, en la verificación de las propiedades locales del sistema y en el análisis de sensibilidad con respecto a los parámetros del sistema. Para la validación funcional se presenta un procedimiento de optimización de los parámetros de calibración del modelo evitando el proceso de ensayo y error tan frecuentemente utilizado.

### 3. VALIDACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO ESPECÍFICO EN ÁREAS INTERMAREALES

#### 3.1 Introducción

En la literatura reciente no se encuentra un procedimiento general y sistemático para la validación de modelos en regiones costeras, lo que hace que el desarrollo y la aplicación de éstos sean el producto de varios años de experiencia del investigador o de un proceso de corrección mediante el uso de información de campo. El objetivo de este capítulo es el de dar un paso en esta dirección al plantear un procedimiento para la validación de modelos hidrodinámicos en regiones costeras en donde el efecto de la marea juega un papel predominante (la aplicación de esta metodología a un modelo hidrodinámico para la bahía de Meldorf localizada en la costa del Mar del Norte alemán se presenta en Palacio, 2002).

Los pasos y el orden aquí recomendados a seguir en la validación de un modelo específico son:

1. Verificación conceptual del modelo; 2. Definición de las condiciones de borde en las fronteras abiertas; 3. Calibración del modelo con respecto a la batimetría; 4. Calibración del modelo con respecto a la rugosidad del fondo; y 5. Validación del modelo. A continuación se presentan cada uno de estos pasos en forma detallada.

#### 3.2. Verificación conceptual del modelo

El objetivo de la verificación conceptual es el de conocer el comportamiento global del modelo y la respuesta de éste a los cambios en los parámetros físicos y numéricos, cambios que se deben hacer dentro de un rango real. El efecto de estos cambios se verifica para los niveles de agua y la velocidad del flujo con puntos de monitoreo distribuidos en el área total del estudio, incluyendo puntos

cerca a las fronteras.

Antes de realizar cualquier análisis de los resultados del modelo, se sugiere hacer animaciones de las velocidades de flujo, durante un ciclo completo de marea ascendente-descendente-ascendente, para verificar que al cambiar los parámetros del modelo no se crean inestabilidades numéricas en el flujo (Palacio, 2002). En el análisis de los resultados del modelo se debe despreciar la información generada en el período de iniciación de la corrida, que debe ser lo suficientemente largo como para que el efecto sobre el patrón de flujo de las condiciones iniciales impuestas en el dominio del modelo desaparezca por completo. A continuación se presentan los pasos a seguir en la verificación conceptual del modelo.

##### 3.2.1. Verificación del comportamiento global del modelo

En este paso inicial el modelo se debe “correr” con parámetros físicos estándar y con un conjunto inicial de condiciones de borde. Estos parámetros y condiciones de borde se pueden tomar de la literatura o de valores obtenidos de estudios previos. Los resultados del modelo en este primer paso deben mostrar suavidad en las curvas de niveles de agua y velocidades, patrones de flujo reales, tanto en los canales como en las llanuras de inundación (durante todo el ciclo de la marea). Las magnitudes absolutas de los niveles de agua y las velocidades no son importantes en este paso preliminar.

##### 3.2.2. Sensibilidad del modelo a cambios en los parámetros numéricos

El objetivo de este análisis es el de establecer los valores de ciertos parámetros relacionados con la discretización numérica de las ecuaciones, de tal forma que los resultados del modelo no se vean afectados por ellos (Palacio, 2002). Algunos de estos parámetros son:

##### \* *Tamaño de la escala de discretización temporal ( $\Delta t$ ).*

Si el método de solución numérica de las ecuaciones hidrodinámicas es condicionalmente estable (esquema explícito) el valor de  $\Delta t$  está condicionado a un valor que produzca un número de Courant menor que 1, en caso contrario, se puede utilizar un valor mayor que 1 y que varía según el esquema numérico utilizado en el modelo. Con este análisis se pretende identificar un valor adecuado para  $\Delta t$ , que no comprometa los resultados del modelo, pero que sea lo suficientemente grande para

hacer simulaciones del modelo en un tiempo computacional aceptable.

\* **Tamaño de las celdas de la malla de discretización espacial.** El objetivo de este análisis es eliminar la influencia de la resolución de la malla en los resultados del modelo mediante el siguiente procedimiento: hacer una corrida del modelo con la malla originalmente creada (se considera esta malla como la malla base para el análisis) y otra corrida con una malla doblemente densa, sin alterar los demás parámetros del modelo; se comparan los resultados de las dos corridas (con respecto a los niveles del agua y a las velocidades del flujo), si resultan diferencias significativas se debe considerar como malla base la malla doblemente densificada y se repite el procedimiento hasta que las diferencias resultantes tengan un orden de magnitud dentro de la precisión esperada.

\* **Tamaño del dominio.** Los objetivos de este análisis son verificar que las fronteras abiertas estén localizadas lo suficientemente lejos de la costa para que garanticen que el fenómeno físico a simular quede completamente contenido en la zona de interés. Se debe crear una nueva malla computacional con las mismas características que la malla base pero ahora con las fronteras abiertas más alejadas. Luego se debe hacer una corrida del modelo con la malla base y otra corrida con la malla nueva, sin alterar los demás parámetros del modelo, y se comparan los resultados de las dos corridas en la zona de interés. Si resultan diferencias importantes, se debe considerar una nueva malla, alejando un poco más las fronteras abiertas, y repetir el procedimiento hasta que las diferencias resultantes tengan un orden de magnitud dentro de la precisión esperada.

### 3.2.3. Sensibilidad del modelo a cambios en los parámetros físicos

El objetivo de este estudio es conocer, de manera global, la respuesta del modelo a cambios en los parámetros físicos. Los valores de la aceleración de la gravedad, la densidad, la temperatura y la salinidad del agua se deben tomar de la literatura, de mediciones de campo o de la experiencia del investigador y permanecerán sin ser cambiados durante esta etapa. Los parámetros físicos más importantes a estudiar son las condiciones de frontera, la batimetría, el coeficiente de rugosidad del fondo, el coeficiente de torbellino y el efecto local del viento. En este estudio se investiga la variabilidad de los niveles de agua y

de las velocidades de la corriente, en varias secciones transversales y en varios puntos de monitoreo en el dominio computacional, con respecto a cambios en los parámetros físicos. Las diferencias en los resultados de las diversas simulaciones del modelo deben ser interpretadas de acuerdo a la física del dominio de estudio.

### 3.3. Calibración del modelo

La calibración de modelo es una de las fases más importantes en el desarrollo de un modelo hidrodinámico. El objetivo de la calibración es reproducir el movimiento de la marea para la situación existente mediante la variación de los parámetros físicos dentro de valores físicamente adecuados. Cada cambio de los parámetros físicos del modelo se debe justificar con base en la física de los datos y en el conocimiento de la región estudiada. El proceso que se presenta a continuación corresponde a la calibración de un modelo 2D Horizontal.

El movimiento de la marea está representado por los niveles de agua y las velocidades del flujo. Los resultados del modelo se evalúan puntualmente, en función del nivel del agua, en varias estaciones de registros distribuidas en el dominio de estudio, y globalmente, en función de la velocidad integrada en la profundidad y el caudal, en varias secciones transversales a los canales de marea. Para evaluar la calidad de los resultados del modelo con respecto a los datos de campo se deben hacer los siguientes análisis:

\* **Simulación de largo período:** para evaluar el modelo con respecto a los niveles de agua durante un ciclo completo marea viva - marea muerta - marea viva. Se deben hacer comparaciones de los niveles de agua medidos y calculados para los valores de marea alta, marea baja y el tiempo de ocurrencia de los mismos, además comparaciones para el registro total de la marea a intervalos de tiempo de  $\frac{1}{2}$  ó 1 hora (Palacio, 2002). Para medir la calidad del ajuste se consideran como criterios: la desviación estándar de los residuos, el valor medio de los residuos, y el parámetro estadístico "rms" (root mean square o desviación cuadrática media) de los residuos definido como:

$$rms = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(Valorcalculado)_i - (Valormedido)_i]^2}{N}} \quad (1)$$

donde N es el número de datos.

**\* Simulación de corto período:** Evaluación del modelo con respecto a la velocidad integrada en la profundidad y al caudal total a través de secciones transversales, para diferentes condiciones de marea. Para cada sección transversal en la que haya información de campo se deben hacer comparaciones entre las velocidades integradas en la profundidad y comparaciones del caudal total a través de cada una de estas secciones transversales. De nuevo se utiliza el parámetro “rms” para medir la calidad de los resultados del modelo.

Los datos de campo deben ser divididos en períodos con tormentas y en períodos con condiciones de viento moderadas. En el proceso de calibración se debe ajustar cada parámetro independientemente, aunque en la realidad no se puede hablar de independencia en los parámetros físicos. Se debe empezar por aquellos que afecten más drásticamente los resultados del modelo según se pudo detectar en el procedimiento de análisis de sensibilidad. Hay que tener mucho cuidado en no sobre calibrar el modelo y aceptar una discrepancia razonable en los resultados, ya que un sólo parámetro no da cuenta del fenómeno total.

### 3.3.1. Parámetros a calibrar

El proceso de calibración a seguir, secuencialmente por orden de importancia, debe comenzar por la definición de las condiciones de borde en las fronteras abiertas del modelo, que es la variable que afecta más drásticamente los resultados; seguida por la calibración de la batimetría del modelo; y por último la rugosidad del fondo. Optar por un orden arbitrario conduce, probablemente, a la obtención de valores para los parámetros alejados de la realidad o a un proceso repetitivo en la calibración de los parámetros. Inicialmente, el estudio se debe hacer en períodos de condiciones de viento moderadas y una vez se obtengan resultados aceptables se debe proceder a calibrar el coeficiente de dragado del viento en períodos donde se tengan tormentas importantes (Palacio et al., 2002a).

**\* Determinación de las condiciones de frontera.** El primer paso en la calibración del modelo se debe centrar en la selección de las condiciones de borde impuestas a lo largo de las fronteras abiertas del modelo. La calidad de los resultados del modelo depende altamente de los valores impuestos como condiciones de borde; si éstos no representan el fenómeno real correctamente los resultados del modelo nunca serán correctos. Las condiciones de borde son las fuerzas generadoras del movimiento dentro del modelo y son las que traen al modelo toda la información que viene del exterior. En general, las condiciones de borde son de tres tipos: niveles de agua, velocidades y caudales. La selección del tipo de condición de borde depende del fenómeno que se desea estudiar. Para el caso de la modelación de fenómenos dominados por la marea se usa con mayor frecuencia la condición de niveles de agua.

Para definir los niveles de agua como condiciones de borde existen diferentes procedimientos, como: utilización de modelos anidados de gran escala, obtención de las componentes astronómicas de la marea e imposición directa de los datos de nivel de agua medidos en campo (ver Palacio et al., 2002b). En esta etapa se busca conseguir resultados adecuados con respecto a los niveles de agua en términos de la fase y la magnitud de la onda (tanto en condiciones de marea muerta como de marea viva), así como también con respecto a la velocidad integrada en la vertical y al caudal a través de una sección transversal para un ciclo de marea descendente – marea ascendente. Un análisis detallado de la determinación de las condiciones de frontera para el modelo hidrodinámico de la bahía de Meldorf, localizada en el Mar del Norte alemán, se puede consultar en Palacio et al. (2002b); Mayerle y Palacio (2002).

**\* Calibración del modelo con respecto a la batimetría.** Después de las condiciones de frontera, el parámetro que sigue en importancia en el proceso de calibración es la batimetría. El objetivo de la calibración de la batimetría del modelo es conseguir (con pequeñas modificaciones de ésta) que los resultados del modelo representen el patrón de flujo real de una forma adecuada. Las variaciones en la batimetría del modelo se deben hacer de manera sistemática para comprender el efecto de estos cambios en el patrón general del flujo. La magnitud de las variaciones dependerá de la escala del modelo y del orden de incertidumbre que se tenga alrededor de la batimetría que se desea calibrar.

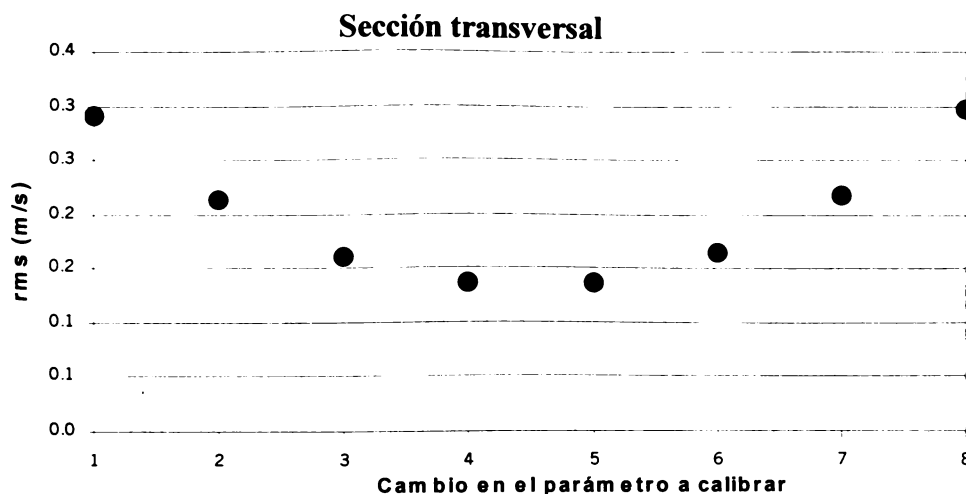
Para la calibración de la batimetría se debe hacer el análisis independientemente para las llanuras de marea y para los canales de marea, es decir, modificar los valores de la batimetría de las llanuras de marea en el dominio completo sin alterar los valores de la batimetría de los canales y, una vez, se obtenga el valor adecuado para éstas se procede a modificar los valores de la batimetría de los canales de marea.

**\* Calibración del modelo con respecto a la rugosidad del fondo.** Una vez obtenidos resultados satisfactorios en la etapa de calibración de la batimetría se debe continuar con la calibración del coeficiente de rugosidad. En esta etapa de la calibración se analiza la distribución espacial de la rugosidad equivalente del lecho y su variabilidad en el tiempo (durante el ciclo de marea) en el área de estudio, preferiblemente basados en información de campo (Mayerle et al., 2002). Un análisis detallado de la calibración del modelo con respecto a la rugosidad del fondo para un modelo hidrodinámico en la bahía de Meldorf se puede consultar en Palacio (2002); Palacio et al. (2001).

### 3.3.2. Procedimiento para la calibración global del modelo

La calibración global del modelo se realiza con respecto a la velocidad promediada en la vertical y al caudal total a través de secciones transversales a los canales de marea considerando toda la información disponible en el dominio de estudio. Se deben realizar simulaciones cortas (1 ó 2 días). A continuación se plantea un procedimiento general de calibración para el área total de estudio que se aplica a los tres parámetros de calibración.

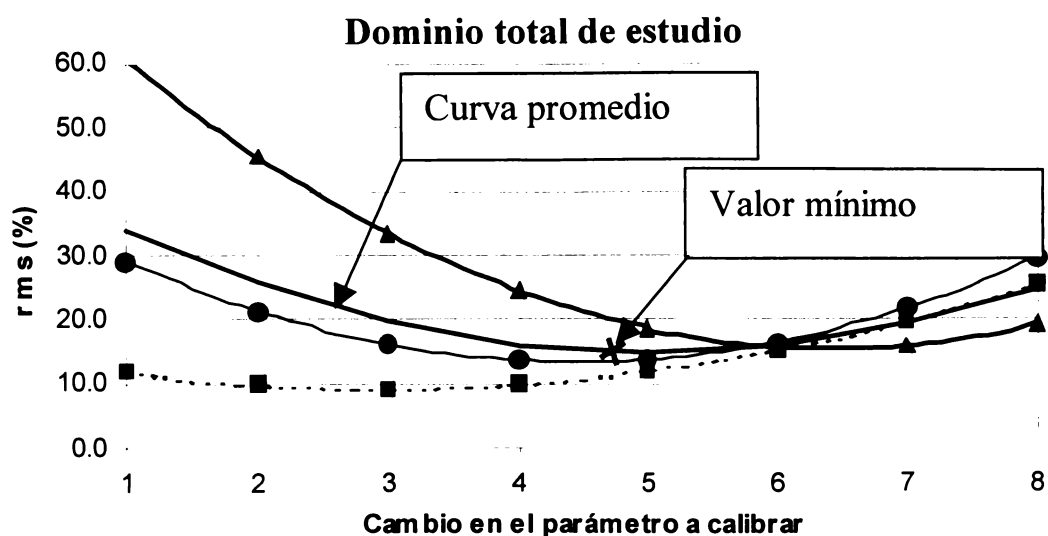
\* En primer lugar se hace un análisis comparativo (para cada sección transversal donde se realizaron mediciones de campo de velocidades) de la influencia sobre las velocidades y el caudal total de los cambios en el parámetro que se va a calibrar. Este análisis consiste en la variación del parámetro, con respecto a un valor inicial, dejando sin modificar los demás parámetros del modelo. Para cada cambio en el parámetro se obtiene un valor del estadístico "rms" de las diferencias entre los resultados del modelo y las mediciones. De esta manera se obtienen varias parejas de datos "cambio en el parámetro" vs. "rms". Estas parejas se grafican para observar la respuesta del modelo a los cambios del parámetro en cada sección transversal donde se realizaron mediciones de velocidades. En la figura 1 se muestra un esquema ilustrativo.



**FIGURA 1.**  
Análisis del estadístico "rms" en una sección transversal

\* Finalmente, se tendrá una gráfica de “cambio en el parámetro” vs. “rms” para cada sección de medición. El valor mínimo del estadístico “rms” para cada sección analizada es posible que se produzca para un valor diferente del parámetro que se está calibrando, es decir, no necesariamente el cambio en el parámetro que produce el valor mínimo del “rms” para una sección producirá el valor más bajo cuando se analizan los datos en otra sección transversal localizada en una zona diferente. Debido a esto, se debe hacer un cambio en el parámetro a calibrar que produzca el valor más bajo del estadístico “rms” en todo el dominio de estudio y para lo cual se plantean dos procedimientos:

\* **Caudal total:** el valor obtenido del estadístico “rms” del caudal total en cada sección transversal se debe adimensionalizar utilizando para ello una característica del caudal en dicha sección (por ejemplo, el valor máximo del caudal). De esta manera se obtiene un valor que se puede comparar con los otros valores obtenidos en las distintas secciones transversales sin importar la magnitud absoluta del caudal en cada una de éstas. Luego se obtiene el promedio entre los valores adimensionalizados en las secciones transversales estudiadas para cada cambio en el parámetro. Se selecciona como opción más adecuada aquella que produce el valor mínimo del estadístico “rms” en la curva promedio de las estaciones estudiadas. En la figura 2 se muestra un esquema ilustrativo en el que hay curvas correspondientes a tres secciones transversales y la curva promedio de ellas.



**FIGURA 2.**  
Selección de la alternativa que produce el valor más bajo del parámetro “rms” en todo el dominio de estudio

\* **Velocidad integrada en la profundidad:** se calcula el valor del estadístico “rms” para cada cambio del parámetro a calibrar usando el conjunto total de mediciones disponibles en el área de estudio sin clasificar por secciones transversales, es decir, se considera cada una de las mediciones de velocidad integrada en la profundidad independiente y se calcula el estadístico “rms” para el conjunto total de datos. En este cálculo se puede usar la magnitud absoluta de los valores. Se selecciona como opción más adecuada aquella que produce el valor mínimo del estadístico “rms”.

### 3.3.3. Calibración local del modelo

Hasta este punto la calibración del modelo se ha hecho para el dominio total de cálculo. A continuación se trabajará el modelo por zonas de influencia determinadas por la localización de las secciones transversales donde se poseen mediciones de corrientes y sus correspondientes cuencas de drenaje.

Debido a que la velocidad del flujo, y a su vez el caudal, están influenciados por los cambios locales de la



batimetría, en esta etapa se debe hacer una calibración localizada, tanto de la batimetría como del coeficiente de rugosidad de fondo, que permita un mejor acercamiento a las condiciones hidrodinámicas reales del área de estudio. Esta calibración local se debe hacer sin perder de vista el comportamiento global del flujo y sin generar cambios o discontinuidades en la batimetría y en el coeficiente de rugosidad del fondo que no puedan ser confrontados con la realidad.

El área total del modelo se debe dividir en cuencas de drenaje, determinadas por la localización de las mediciones de campo de velocidades en las diferentes secciones transversales a los canales. Se empieza, entonces, la calibración local en las zonas aledañas a las fronteras abiertas, para proseguir en dirección a la costa y una vez alcanzada ésta retroceder nuevamente hasta las fronteras abiertas. La razón para adoptar esta dirección es que se parte del hecho de que las condiciones de frontera son conocidas y aceptables, por lo que se debe garantizar, en primer lugar, que el volumen de agua que entra al modelo sea consistente con la realidad. Una vez logrado esto, se debe conseguir que el volumen de agua que entra continúe ajustándose a las medidas de campo en las distintas secciones transversales. En este movimiento desde las fronteras abiertas hacia la costa, la calibración se debe concentrar principalmente en el ciclo de marea ascendente, y en el siguiente paso, o sea cuando se regresa de la costa hacia las fronteras abiertas, el interés será puesto en el ciclo de marea descendente.

### 3.4. Validación del modelo

La validación del modelo es la última etapa que se debe hacer en su desarrollo antes de su aplicación. Durante este proceso no se pueden alterar los parámetros del modelo obtenidos en la etapa de calibración ya que el objetivo de la validación es verificar la pertinencia de los resultados del modelo para otros conjuntos de datos diferentes a los utilizados en la calibración (Palacio, 2002; Gerritsen et al., 1995; Dee, 1995). Para evaluar la calidad de los resultados del modelo con respecto a los datos de campo se deben utilizar los mismos criterios de bondad de ajustes usados en el proceso de la calibración, tanto para los niveles de agua como para las velocidades y el caudal total. De igual manera que en el proceso de calibración, durante la validación del modelo se deben realizar simulaciones de largo período para evaluar el modelo con respecto a los niveles de agua durante un

ciclo completo marea viva – marea muerta – marea viva, y simulaciones de corto período para evaluar el modelo con respecto a las velocidades y al caudal total.

## 4. CONCLUSIONES

Con la metodología presentada se busca estructurar el proceso de calibración, que es una de las fases más importantes en el desarrollo de un modelo hidrodinámico. Se planteó un análisis de las variaciones de los parámetros de calibración más relevantes en el modelo computacional, utilizando como criterio de calidad de la calibración el estadístico “rms” de los residuos entre los resultados del modelo y los datos medidos, en función de la velocidad integrada en la profundidad y del caudal total. El valor del parámetro que produce el mínimo en la curva promedio del estadístico “rms” vs. variación en el parámetro a calibrar” en todo el dominio de estudio, corresponde al valor óptimo de dicho parámetro.

Los pasos y el orden recomendados a seguir en la validación funcional de un modelo específico son: 1. Verificación conceptual del modelo; 2. Definición de las condiciones de borde en las fronteras abiertas; 3. Calibración del modelo con respecto a la batimetría; 4. Calibración del modelo con respecto a la rugosidad del fondo; 5. Validación del modelo.

Los resultados del modelo se evalúan puntualmente, en función del nivel del agua (simulaciones de largo período), en varias estaciones de registros distribuidas en el dominio de estudio, y globalmente, en función de la velocidad integrada en la profundidad y el caudal (simulaciones de corto período), en varias secciones transversales a los canales de marea.

Los resultados de la calibración del modelo se presentan en función de los niveles de agua, de las velocidades y de los caudales dado que estas variables representan el movimiento de la marea. Se busca que el modelo capture en primer lugar los niveles de agua y luego las velocidades de flujo.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Dee, D. P., 1995. A pragmatic Approach to Model Validation. American Geophysical Union. Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Studies, Vol. 47, 1-13. Washington.
- Gerritsen, H., Vries, J.W. y de, Philippart, M.E., 1995. The Dutch Continental Shelf Model. Quantitative Skill Assessment for Coastal Ocean Models, Coastal and Estuarine Studies, Vol.48
- GESAMP, 1991 (IMO/FAO/UNESCO/WMO/WHO/IAEA/UN/UNEP Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution). Coastal Models. GESAMP Reports and Studies N0. 43. International Atomic Energy Agency, Vienna.
- AHR Bulletin, 1994. Publication of guidelines for validation documents and call for discussion. Internat. Assoc. Hydraulic Res. Bull., 11, 41.
- Mayerle, R., Razakafoniaina, T., y Palacio, C., 2002. Pramono, G., Bed Forms and Equivalent Roughness Sizes in Tidal Channels, in River Flow 2002, IAHR, Louvain-la-Neuve, Belgium.
- Mayerle, R. y Palacio, C., 2002. Open Boundary Condition Approaches for Near Coastal Area Models, in 13th Congress of the Asia and Pacific Division of the IAHR, Singapore.
- Palacio, C.A., 2002. Metodología para la validación de modelos hidrodinámicos utilizando amplia información de campo: aplicación a la bahía Meldorf en la costa del mar del Norte alemán. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Postgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos.
- Palacio, C., Mayerle, R., y Toro, M., 2002a. Modelo Anidado de Gran Escala para Simular Tormentas en el Mar del Norte. XV Seminario de Hidráulica e Hidrología. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. (in Spanish)
- Palacio, C., Mayerle, R., y Toro, M., 2002b. Metodologías para la Definición de las Condiciones de Borde en las Fronteras Abiertas en Modelos Costeros. XX Congreso Latinoamericano de Ingeniería Hidráulica. La Habana, Cuba (in Spanish).
- Palacio, C.A., Winter, C. y Mayerle, R., 2001. Set-Up of a Hydrodynamic model for the Meldorf Bight. In World water y environmental resources congress 2001 [ASCE/EWRI], Orlando, USA.
- Sage, A. P., 1987. Models. System y Control Encyclopedia, M. G. Sigh (ed.), Pergamon Press, Oxford, p. 3083.
- Stelling, G.S., 1984. On the construction of computational methods for shallow water flow problems. Ph. D. Dissertation, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Toro, F.M., 1994. Verification of the CCHE – 3D Hydrodynamic Model for Open Channel Flow. Ph. D. Dissertation, The University of Mississippi.