

# SISTEMAS DE SOPORTE DE DECISIONES PARA LA CREACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS HIDRODINÁMICOS

FERNANDO TORO\*

## Resumen

Este artículo hace una corta descripción de las fases y pasos durante el desarrollo de un modelo numérico hidrodinámico y de las características que debe tener un Sistema de Soporte de Decisiones (SSD) que asista al investigador en esta actividad. El SSD maneja, integra y analiza los resultados numéricos del modelo y los datos de campo, que se han incrementado mucho debido a los avances tecnológicos de las últimas décadas en este ramo.

**PALABRAS CLAVE:** Sistema de Soporte de Decisiones, SSD; modelos numéricos; desarrollo de modelos hidrodinámicos.

## Abstract

This paper presents a short description of the phases and steps for the development of hydrodynamic numerical models and the characteristics of a Decision Support System (DSS) that assists researchers in this activity. The DSS manages, integrates, and analyzes the numerical results from the model and in-situ measurements, which have been incrementing due to the technological advances in this field in the last decades.

**KEY WORDS:** Decision Support Systems, DSS; numerical models; development of hydrodynamic models.

---

\* Doctor en Ciencias Naturales, 2003. Universidad Christian Albrechts, Alemania. Master en Ciencias, 1998. Universidad de Mississippi, U.S.A. Ingeniero Civil, 1993. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia. Filiación: International Marine and Dredging Consultants, IMDC. fto.imdc@technum.be

Artículo recibido 17-V-2004. Aprobado con revisión 27-VII-2004.  
Discusión abierta hasta enero 2005.

## 1. INTRODUCCIÓN

Un modelo numérico es la representación matemática, con la ayuda de algoritmos numéricos, de un fenómeno físico con el objetivo de estudiarlo efectivamente. El uso de modelos numéricos es más popular recientemente debido a los avances tecnológicos en el campo de los computadores y a las grandes ventajas que tienen respecto a los modelos físicos, tales como su conveniencia, eficiencia y rapidez; además, son una opción relativamente económica para estudiar problemas reales. En el contexto de la hidrodinámica, un modelo numérico ayuda a reproducir las condiciones de flujo bajo ciertas condiciones iniciales y de frontera y ciertas premisas, por ejemplo, si el problema puede estudiarse en una o dos dimensiones. Cabe anotar que, en el campo de la hidrodinámica, existen casos complejos de flujo en los que el modelo físico es necesario, o situaciones donde el tiempo de modelación es mayor al tiempo real y donde el modelo físico tiene ventajas sobre el modelo numérico.

Para obtener información confiable de un modelo numérico, su desarrollo debe incluir una evaluación completa de los resultados. Este proceso toma tiempo, algunas veces es tedioso e incluye la comparación de los resultados numéricos con datos medidos. La comparación de datos se facilita con análisis estadísticos y comparando grupos de datos presentados en gráficas y tablas que resumen los valores numéricos.

Los últimos avances tecnológicos en el campo de los modelos numéricos y los equipos de medición han originado un gran incremento en la cantidad de resultados numéricos y datos de campo, produciendo nuevos desafíos para su procesamiento y análisis. Estos avances también han llevado a un incremento importante en el tiempo requerido para el análisis de estos datos respecto a la duración de las simulaciones numéricas.

Las labores de procesamiento y análisis de los datos incluyen varias fuentes y tipos de datos. Las pro-

piedades de los diferentes tipos de datos varían en forma significativa, lo que impone la creación de distintas herramientas analíticas para cada tipo de dato. Mientras que cada herramienta es muy eficiente manejando el tipo de dato para la cual fue diseñada, hay una ausencia de sistemas que generen un ambiente común de trabajo que facilite el manejo de todos los tipos de datos necesarios para el desarrollo de los modelos numéricos (Oliveira y Ribeiro da Costa, 2000). La integración de estas herramientas es difícil debido a las diferencias en la estructura de los datos, su función, métodos de entrada y salida, interfaz para el usuario y el intercambio de información entre ellos (Fu et al., 2000). Hay, por lo tanto, una necesidad de sistemas que generen un ambiente común de trabajo que cubran efectivamente todo este espectro.

Como si fuera poco, no existe un procedimiento único para el desarrollo de modelos numéricos debido a la gran cantidad de variables que intervienen en un modelo. Estas variables y su nivel de importancia dependen del objetivo del estudio.

A pesar de todas estas dificultades, nuevas tecnologías, como los Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD), facilitan el desarrollo de modelos numéricos integrando herramientas de software para ayudar al investigador durante las diferentes fases de su desarrollo y permitir el manejo, procesamiento y análisis de datos numéricos y de campo.

Este artículo presenta un procedimiento para el desarrollo de modelos numéricos hidrodinámicos y las características que debe tener un SSD para ayudar a los investigadores en esta actividad.

## 2. DESARROLLO DE MODELOS NUMÉRICOS HIDRODINÁMICOS

El desarrollo de un modelo numérico hidrodinámico, desde la identificación del problema hasta la obtención de resultados, es un proceso largo. Para disminuir este esfuerzo y reducir la posibilidad

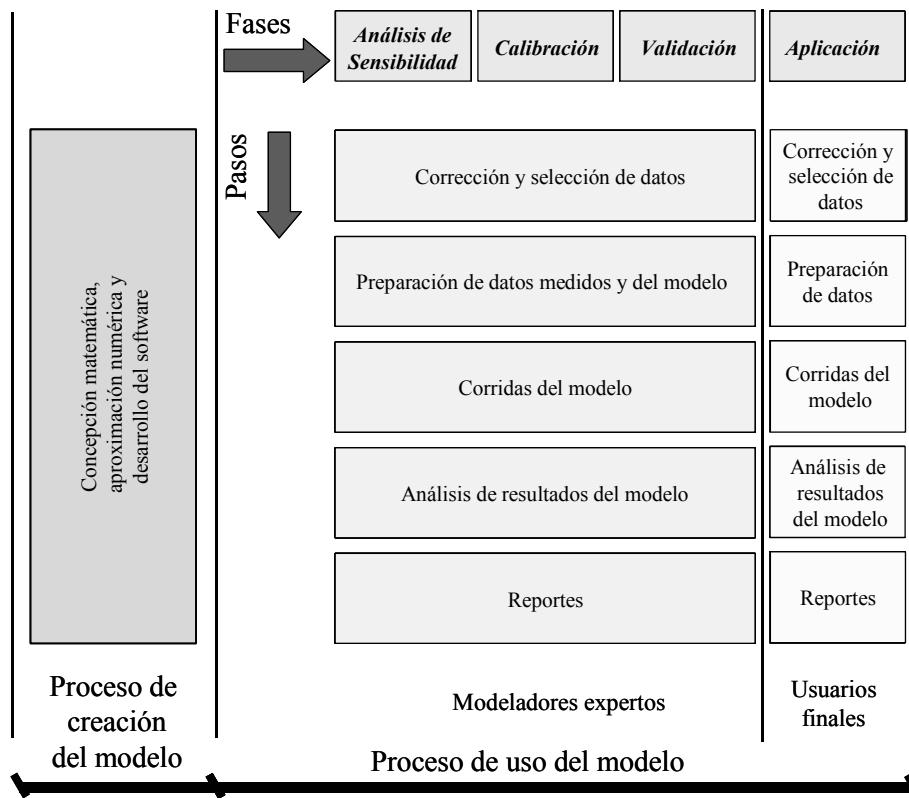


de errores durante su desarrollo, la creación de un procedimiento claro y la disponibilidad de las herramientas necesarias, tales como un SSD, es de gran importancia.

Sin embargo, no existe un procedimiento único para el desarrollo de modelos numéricos en general ni para modelos hidrodinámicos, que es el caso que nos concierne en este artículo, debido al gran número de variables que intervienen en un modelo. Tales variables y su nivel de importancia dependen de la finalidad del estudio. Aun más, como la modelación numérica es una tecnológica relativamente reciente, incluso no hay consenso en la terminología entre los autores y es difícil encontrar procedimientos estándares en la literatura que orienten esta tarea. A pesar de estas dificultades, ha habido algunos intentos para coleccionar los términos técnicos y

crear un glosario para el desarrollo de modelos (p. ej. Dee [1995] y Roache [1998]); adicionalmente, AIAA (1998), Dee (1995) y Dee et al. (1994) presentan unas guías generales para el desarrollo de modelos numéricos, por lo que se puede establecer una metodología básica y en particular para el desarrollo de modelos numéricos hidrodinámicos, que se presenta a continuación.

De esta manera el termino “*desarrollo de modelos numéricos hidrodinámicos*” corresponde a las fases sucesivas, cada una con un modelo mejor que la fase anterior, hasta obtener un modelo que pueda reproducir en forma satisfactoria la situación hidrodinámica real. Cada una de estas fases contiene varios pasos que comparten información con la fase anterior y la siguiente. La Figura 1 muestra las fases y pasos para el desarrollo de un modelo numérico hidrodinámico.



**Figura 1.** Fases y pasos para el desarrollo de modelos numéricos hidrodinámicos

Las fases en el desarrollo de un modelo pueden ser divididas en dos procesos principales: la “*creación del modelo*” y “*uso del modelo*”. Durante el proceso de creación del modelo los componentes generales del modelo se desarrollan. Estos componentes incluyen la concepción matemática de la solución, la aproximación numérica y el desarrollo del software acompañado de un control de calidad. Durante el proceso de uso del modelo, los “*modeladores expertos*” y los “*usuarios finales*” implementan estos componentes generales a casos específicos. Los modeladores expertos realizan el análisis de sensibilidad, la calibración y la validación del modelo para un caso específico, ajustando el modelo con parámetros numéricos y físicos hasta reproducir el fenómeno del mundo real. Por último, los usuarios finales aplican el modelo ya desarrollado para crear escenarios.

## 2.1. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad tiene como objetivo conocer el comportamiento global del modelo numérico y su respuesta a cambios en los parámetros numéricos y físicos. Los parámetros del modelo son cambiados dentro de unos rangos realistas para evaluar su importancia en los resultados del modelo. El intervalo de tiempo y el espaciamiento de la malla de cómputo son ejemplos de parámetros numéricos, mientras que los parámetros físicos incluyen las condiciones de frontera, la batimetría, la rugosidad, los coeficientes de arrastre del viento, etc.

Esta es la primera fase en el proceso de uso del modelo y está caracterizada por el uso extensivo de datos debido a la gran cantidad de resultados del modelo que resultan al hacer el refinamiento de los parámetros numéricos y físicos. En esta fase, se definen los valores de los parámetros numéricos y se eligen los parámetros físicos que tienen un efecto en los resultados.

El análisis de sensibilidad tiene varios pasos (ver Figura 1):

- En la “*corrección y selección de datos*” se eligen los datos utilizados como condiciones de frontera. Los datos medidos son corregidos, seleccionados y almacenados; éstos son usualmente datos que necesitan un cambio de formato y ser procesados para cumplir con los formatos de entrada del modelo numérico. En este punto se definen el período de tiempo y dominio del modelo.
- La “*preparación de datos medidos y del modelo*” incluye la preparación del modelo, como es la creación de la malla de cómputo y la definición de algunos parámetros físicos y numéricos por defecto (pero dentro de un intervalo lógico). En este punto el modelador hace suposiciones y simplificaciones para construir el modelo y reproducir la situación real, ya sea con un modelo en una, dos o tres dimensiones dependiendo de las suposiciones hechas y de los resultados esperados para la toma de decisiones.
- Las “*corridas del modelo*” es el paso principal de esta fase y se refiere a la determinación del cambio en los resultados numéricos causados por cambios en los datos de entrada. Es importante también evaluar si la simplificación a un modelo de una o dos dimensiones es válida.
- El “*análisis de resultados del modelo*” es el paso en el que los resultados del modelo son analizados por medio de la experiencia del modelador y comparados con otros resultados del modelo. Este paso da una realimentación al modelador para escoger nuevos parámetros para correr nuevamente el modelo.
- Los “*reportes*” documentan el trabajo hecho y resumen la experiencia y conclusiones obtenidas durante esta fase. Estos informes escritos se usan como referencia en las siguientes fases del desarrollo del modelo. Una característica importante para sistemas de información exitosos es que suministran información en un formato apropiado para el usuario (Keenan, 1998).



## 2.2. Calibración

El objeto de la calibración es ajustar los parámetros físicos en el modelo para reproducir las condiciones en el área de estudio. Los cambios en los parámetros deben justificarse basados en la física de los datos y la región estudiada.

Los parámetros físicos son cambiados durante la calibración para reproducir los datos medidos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las mediciones pueden tener imprecisiones y errores. Además, puede suceder que, ajustando algunos parámetros del modelo para reproducir las mediciones en cierto sitio e intervalo de tiempo, se reduce la calidad de los resultados del modelo respecto a las mediciones en otros sitios del dominio con diferentes períodos y condiciones. El modelador debe, entonces, encontrar un equilibrio durante la calibración para cierto parámetro y buscar condiciones “suficientes”. Aun más, el modelador no puede sobrecalibrar el modelo, porque la calibración se hace con un parámetro al tiempo, pero en realidad todos los parámetros actúan simultáneamente (Palacio, 2002).

Al igual que el análisis de sensibilidad, la fase de calibración del modelo tiene los pasos de selección y corrección de datos, preparación de datos medidos y del modelo, corridas del modelo, análisis de resultados del modelo y reportes.

En la selección y corrección de datos hay mediciones in situ usadas para la comparación con los resultados del modelo. Las mediciones están en la forma de series de tiempo en cierto sitio (por ejemplo, niveles de agua en una estación de medida) o mediciones en cierta área durante un período de tiempo determinado (por ejemplo, mediciones de velocidad en una sección transversal o batimetría para cierta área del dominio). Todos estos datos medidos necesitan normalmente ser formateados y filtrados antes de usarse en comparación con los resultados del modelo. Los datos de campo disponibles deben ser divididos en dos grupos: uno para uso en la calibración y el segundo en la validación.

Finalmente, la comparación de los resultados del modelo con las mediciones ayuda a los modeladores a seleccionar los parámetros físicos que van a usar. Este procedimiento en el cual la física detrás del problema debe ser tenida en cuenta, necesita hoy en día de herramientas de software que optimicen este trabajo. Los procedimientos y herramientas estadísticos usados para el análisis de datos (modelo contra mediciones) en la calibración es similar a los usados en el análisis de datos durante el análisis de sensibilidad (modelo contra modelo). Este análisis de datos da criterios al modelador para asignar nuevos valores a los parámetros y correr el modelo nuevamente, si es necesario. Este paso puede ser tan complejo como sea necesario de acuerdo con la precisión esperada, y para esto deben utilizarse algunas herramientas estadísticas.

## 2.3. Validación

“La validación es el proceso de evaluar la credibilidad de la simulación del modelo, dentro de su dominio de aplicación, determinando si el modelo correcto fue desarrollado y estimando el grado hasta el cual este modelo es una representación precisa de la realidad desde la perspectiva de sus usos propuestos” (Metha, 1995). La habilidad del modelo en reproducir las condiciones de campo, con ciertos niveles de precisión, se verifica durante la validación del modelo.

La validación tiene los mismos pasos del análisis de sensibilidad y la calibración. Sin embargo, el grupo de datos usado en la fase de validación difiere de los datos usados en la fase de calibración. Durante la preparación de datos medidos y del modelo las condiciones de borde y el montaje inicial se definen sin alterar los parámetros numéricos y físicos obtenidos en la fase de calibración. Durante el análisis de los resultados ha de tenerse en cuenta que, por causa del error intrínseco en las mediciones, debe haber necesariamente una tolerancia en el error, que depende del objetivo del estudio.

## 2.4. Aplicación

La aplicación es la última fase en el desarrollo del modelo y es hecha por los usuarios finales que utilizan el modelo ya validado para tomar decisiones. El modelo validado se usa para reproducir sucesos, monitoreo en tiempo real o pronósticos. Durante la reproducción de sucesos, el modelo reproduce una condición anterior y sus cambios en el tiempo. Durante el monitoreo, el modelo reproduce un fenómeno físico en tiempo real, tal como las corrientes en un puerto (NOAA, 1999), una bahía (Schmalz, 2001, y Ward et al., 2001) o un canal (Schmalz, 1999). En los pronósticos, el modelo predice las condiciones del flujo siguiendo varios escenarios para estudiar un problema y sus posibles soluciones en ingeniería. El modelo hidrodinámico en esta fase se suele llamar “modelo dedicado”.

## 3. MEDICIONES PARA EL DESARROLLO DE MODELOS NUMÉRICOS HIDRODINÁMICOS

El uso de datos medidos en el desarrollo de modelos ha crecido enormemente en los últimos años por causa de los avances tecnológicos en los equipos de mediciones que facilitan la recolección de datos. En consecuencia, cada vez hay más datos medidos que se comparan con los resultados del modelo durante su desarrollo.

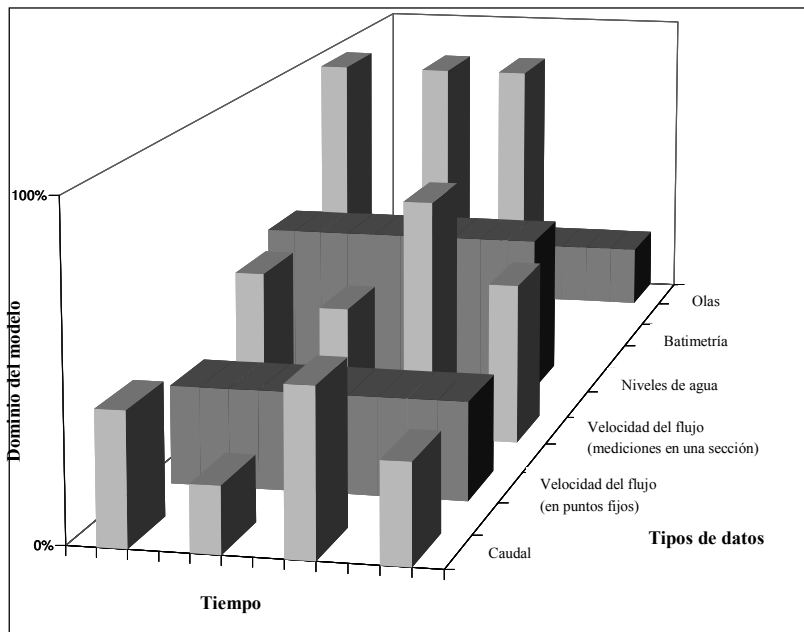
La manipulación de datos de campo usada en modelos hidrodinámicos se complica debido a los diferentes tipos de datos y a su distribución en el espacio y el tiempo. La Figura 2 muestra cómo los datos para estudiar la hidrodinámica en áreas costeras dependen del espacio (en todo el dominio del modelo) y del tiempo. El eje de tiempo se refiere al intervalo de tiempo en el cual cierto parámetro está disponible.

Este intervalo puede ser más largo que el período de simulación del modelo y entonces solo parte de los datos se utilizan. Algunas veces puede haber una ausencia de datos que hace difícil la selección del intervalo de tiempo más propicio para las simulaciones. Además del intervalo de tiempo, la periodicidad de las mediciones puede ser de importancia. El eje del dominio del modelo se refiere a los sitios donde los datos están disponibles dentro del dominio del modelo. Va desde cero, que significa que no hay datos disponibles para cierto parámetro, hasta 100%. Al igual que en el eje del tiempo, la localización de las muestras durante las mediciones puede ser crítica para ciertos procedimientos e interpolaciones. Finalmente, el tipo de datos se refiere a las magnitudes medidas y depende de los parámetros considerados en el modelo, su fuente y calidad.

Todos los datos disponibles necesitan un buen procesamiento para asegurar que las conclusiones obtenidas de sus comparaciones con los resultados del modelo tengan la precisión requerida por el modelador. Para minimizar los errores durante la manipulación de los datos, un procedimiento consistente debe ser adoptado y deben estar disponibles herramientas de software para manejar estos datos.

El tipo de mediciones más comunes usadas para el desarrollo de modelos numéricos durante el estudio hidrodinámico son los niveles de agua, velocidad de la corriente y caudal.

Las series de tiempo con niveles de agua se utilizan para la definición de las condiciones de borde y en la calibración y validación del modelo. Las estaciones de medida deben estar distribuidas a lo largo de todo el dominio del modelo. Los datos medidos deben cubrir los períodos de tiempo en los cuales el investigador está interesado y los períodos cuando se toman las mediciones de velocidad.



**Figura 2.** Tipos de datos y su distribución en el espacio y el tiempo

Varios métodos se han desarrollado para medir la velocidad y dirección de la corriente y observar los patrones de flujo. Se han creado nuevos sensores para la medición de corrientes, tales como el ADCP (por sus siglas en inglés de Acoustic Doppler Current Profiler). El equipo ADCP es muy usado hoy en día para mediciones de la velocidad debido a su versatilidad y facilidad. Estos instrumentos utilizan el principio del efecto Doppler para obtener la velocidad de las partículas en suspensión.

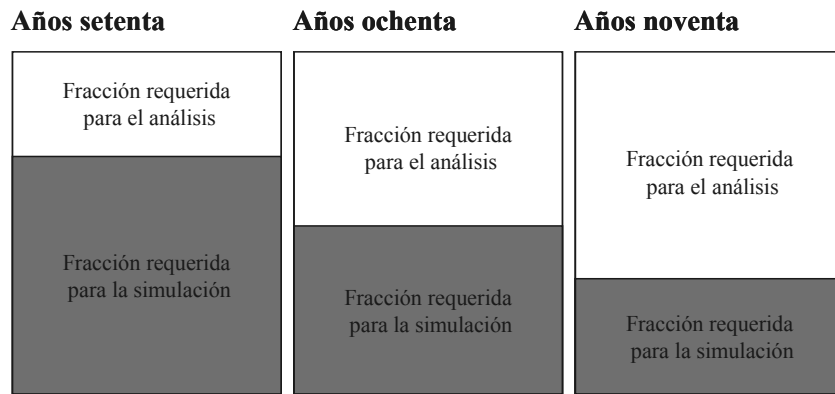
Las mediciones de caudales son más apropiadas en ríos y estuarios, pero también pueden ser útiles en áreas costeras. El caudal es una forma de medir el efecto de la velocidad y los niveles de agua simultáneamente en un solo parámetro y se obtiene en las secciones transversales donde se toman las mediciones de velocidad. Los caudales se usan para calcular balances de volúmenes de agua que entran y salen de cierta área en el dominio del modelo; tam-

bién se usan durante la calibración y validación para verificar los resultados del modelo. En estos casos las diferencias entre los resultados numéricos y los datos medidos se calculan y se vuelven adimensionales usando alguna característica del canal en la sección, como el máximo caudal en la sección transversal (Palacio, 2002 y Fokking et al., 1998), lo cual permite comparaciones entre varias secciones.

## 4. SISTEMAS DE SOPORTE DE DECISIONES

Se ha visto como el manejo de información para el desarrollo de modelos numéricos hidrodinámicos es una tarea difícil como consecuencia de las diferentes fuentes, tipos y formatos de los datos, además de su volumen que crece aceleradamente hoy día en la “era de la información”. Una forma eficiente de acceder, analizar y almacenar esta información de una manera rápida y precisa es crucial para hacer más eficiente el proceso de desarrollo de modelos numéricos.

La Figura 3 muestra la comparación hecha por Schmaltz (2001) de los porcentajes de tiempo gastados en las últimas décadas durante las actividades de modelación. Se ve como el tiempo de simulación se reduce cada vez más debido a la existencia de máquinas más poderosas y mejores algoritmos, a pesar de tener actualmente modelos más complejos. Y por otro lado, el tiempo gastado en el análisis de los resultados se ha incrementado mucho respecto al tiempo de simulación por la dificultad para procesar e interpretar más volúmenes de información.

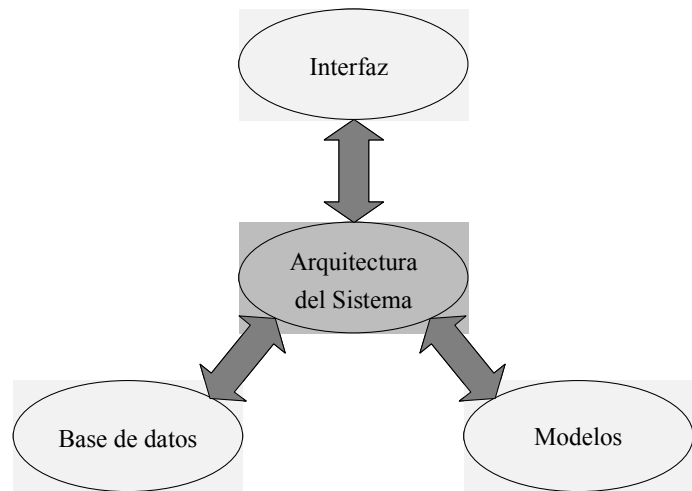


**Figura 3.** Evolución del tiempo de simulación y análisis durante el desarrollo de un modelo

Por todo esto las herramientas de software que ayuden al investigador en el desarrollo de modelos numéricos son de vital importancia en la actualidad. Una manera eficiente de manejar esta información para su almacenamiento y análisis es mediante un sistema de soporte de decisiones (SSD).

“Un ‘sistema de soporte de decisiones’ (SSD) es un sistema interactivo basado en computadores y orientado a ayudar a los que toman decisiones para usar los datos y los modelos para identificar y resolver problemas y tomar decisiones. Ayuda a obtener información, resumir y analizar datos relevantes en la decisión” (Power, 1997). Como se infiere de la definición anterior, un SSD ofrece herramientas e información al usuario, pero incluso el mejor SSD no elimina malas decisiones si se hacen preguntas equivocadas o se sacan conclusiones equivocadas de los resultados del SSD.

Un SSD debe tener integrados tres componentes (ver Figura 4): la “interfaz”, la “base de datos” y los “modelos”. Es importante aclarar que estos componentes deben estar integrados y que la sola colección de las herramientas de software pueden ayudar a tomar decisiones, pero no constituyen un SSD (Keenan, 1998).



**Figura 4.** Componentes de un SSD

La interfaz es la parte del SSD que interactúa con el usuario, debe ser amigable y usualmente incluye componentes gráficos; en este último caso, es llamada interfaz gráfica del usuario (GUI, por sus siglas en inglés). Son características de la interfaz:

- Debe ser fácil de usar, intuitiva, lógica y lo suficientemente general para minimizar errores y optimizar el tiempo durante el manejo de datos y su interpretación.
- Debe permitir el control de la base de datos y de los modelos del sistema.





- Debe concentrarse en decisiones específicas y tener como objeto ayudar, más que remplazar, a los usuarios.

La base de datos es la colección de datos que organiza de tal manera que su contenido pueda ser fácilmente encontrado, manejado y actualizado. La base de datos del SSD suministra datos para ser usados por los modelos del sistema y permite al usuario una oportunidad directa de explorar los datos relevantes al problema.

Los modelos del SSD se encargan de la evaluación, análisis y correlación de la información de las diferentes fuentes disponibles en la base de datos.

La “*arquitectura*” del SSD se refiere a cómo los componentes del sistema están integrados y conectados.

Los datos de entrada se incorporan en el sistema a través de la interfaz y se almacenan en la base de datos. Las instrucciones al sistema las da el usuario por medio de la interfaz, que pasa el tipo de análisis para ser hecho por los modelos del sistema y los datos disponibles en la base de datos. Finalmente, la salida de datos se presenta en forma de tablas con resultados estadísticos o se muestran en gráficas y figuras.

## 5. SSD PARA LA CREACIÓN DE MODELOS NUMÉRICOS HIDRODINÁMICOS

Un SSD para el desarrollo de modelos hidrodinámicos está obligado a tener un diseño versátil, debido a la dificultad para tener un procedimiento estándar. Así, los componentes del SSD deben permitir diferentes procedimientos para desarrollar un modelo, compartir información y tener mecanismos que de modo efectivo manejen los datos que el usuario necesita y en la forma deseada.

Un SSD para la creación de modelos hidrodinámicos debe ser orientado a los modelos. Los SSD orientados a modelos han sido llamados

“orientados a modelos”, “basados en modelos” u “orientados a cálculos” (Bonczek et al., 1980). Estos sistemas usan parámetros suministrados por el usuario para hacer los cálculos, pero usualmente no son necesarias grandes bases de datos. En nuestro caso de modelos hidrodinámicos, los modelos deben tener básicamente la capacidad de cambiar el formato de los datos y herramientas estadísticas que permitan correlacionar información y simplificar los datos en un grupo de parámetros que faciliten al usuario entender el proceso físico. Estos datos deben agruparse en unas pocas tablas o gráficas, con las cuales los que toman las decisiones escogen el modelo óptimo que satisfaga sus expectativas dentro de un intervalo de confianza requerido. En consecuencia, un SSD de este tipo debe automatizar, optimizar y agilizar el procedimiento para el procesamiento de datos medidos y su comparación con los resultados del modelo numérico.

El SSD debe tener énfasis en el manejo de los niveles de agua y velocidades, que son usualmente las magnitudes usadas durante las tres fases, análisis de sensibilidad, calibración y validación, del desarrollo de un modelo hidrodinámico.

La gran mayoría de los intentos para el desarrollo de un SSD para la creación de modelos hidrodinámicos son sistemas que se enfocan a aplicaciones específicas y al manejo de datos generados por modelos dedicados (WL Delft Hydraulics, 2002; Abebe y Price, 2002; Andreu et al., 2002; Kukuric, 1999; Harris et al., 1993). Estos sistemas tienen deficiencia en las herramientas para manejar datos medidos con el objetivo de compararlos con los resultados del modelo y realizar análisis estadísticos durante su desarrollo.

La diferencia entre los modelos del SSD y el modelo numérico debe aclararse aquí. Mientras que el último es la herramienta de software usada para resolver las ecuaciones diferenciales parciales para la hidrodinámica, los modelos del SSD son herramientas de software para relacionar y analizar los resultados numéricos de las mediciones in situ.

Los datos procesados por el SSD son notablemente dependientes del espacio. Esta dependencia espacial debe tenerse en cuenta para incluir herramientas que permitan su manejo. Por esta razón, un DSS construido a la luz de un sistema de información geográfica (SIG) se vería enormemente beneficiado con herramientas para el manejo de datos espaciales y su fácil interacción con otros tipos de datos presentes en la base de datos. En este caso el SIG sería utilizado como un generador del DSS (Kenaar, 1997). Aunque los SIG traen muchas capacidades para el manejo de datos espaciales, la dificultad aparece con la presencia de datos no espaciales en el sistema, v. gr. series de tiempo de niveles de agua en una estación.

La base de datos relacional es el tipo más común de base de datos usado en estudios con modelos hidrodinámicos. En una base de datos relacional, los datos son almacenados en tablas, que se definen de tal manera que puedan ser reorganizadas y sus datos obtenerse de diferentes maneras. La base de datos del sistema es necesaria, debido a los diferentes tipos de variables consideradas en el análisis y las diversas formas de seleccionar los datos para el análisis durante el desarrollo del modelo. La importancia de la base de datos en el SSD radica en su versatilidad

para la selección de los datos para el análisis, más que en su capacidad para el almacenamiento de grandes volúmenes de información.

El análisis estadístico debe estar abierto al usuario para definir el criterio que se usará en la decisión y su interpretación, y se hace mediante varios parámetros.

Por ejemplo, el SSD desarrollado por Toro (2003) tiene implementados la media, la desviación estándar, el parámetro ponderado –conocido en inglés como “RMS” (Root Mean Square)– y el error absoluto de la media relativa –conocido en inglés como “RMAE” (Relative Mean Absolute Error)–. Además, incluye dos tipos de comparación de los datos: “amplitud/fase” y “discrepancias”.

Con la amplitud/fase se comparan series de tiempo. Este análisis se emplea para magnitudes que tienen un comportamiento cíclico y tienden a repetir sus valores después de cierto lapso. Este análisis chequea la diferencia en altura (amplitud) y tiempo (fase) entre los picos de dos series de tiempo (ver Figura 5); corresponde a un análisis de la evolución de la magnitud en el tiempo. Este tipo de análisis por lo general se utiliza para evaluar niveles de agua.

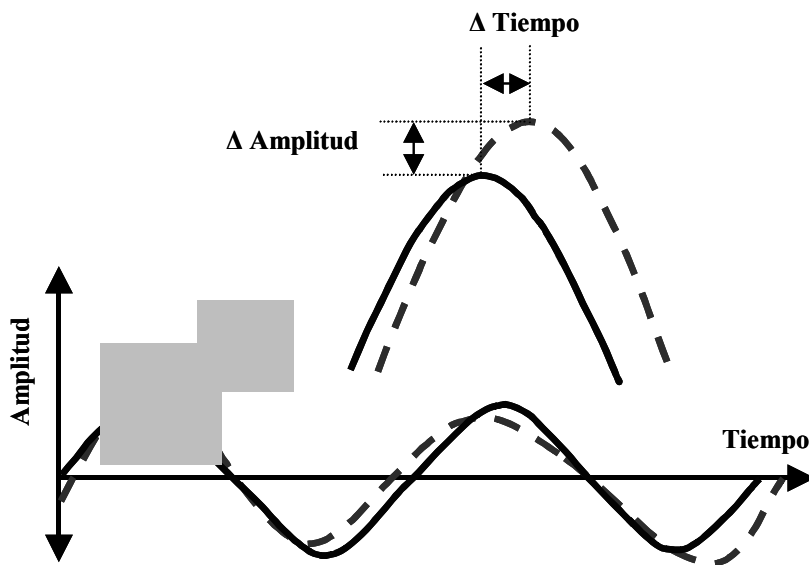


Figura 5. Diferencias en amplitud y tiempo entre los picos de dos series de tiempo



A diferencia del análisis de amplitud/fase, el análisis de discrepancias es más ajustado para comparar grupos de datos que son más dependientes del espacio, como las velocidades del flujo en diferentes sitios en el dominio del modelo y en un instante determinado. En este análisis, las diferencias entre los valores en los sitios seleccionados en el espacio se calculan y evalúan.

Sin embargo, a pesar de tener el número de parámetros estadísticos y el tipo de comparación limitados, el usuario tiene completa libertad en la selección de los datos que van a ser comparados usan-

do criterios espaciales o temporales; por ejemplo (ver Figura 6):

- seleccionar todos los datos para ver el desempeño global del modelo,
- o seleccionar un grupo de datos más pequeño en solo cierta parte del modelo para ver los resultados en ese sitio,
- o escoger los datos según un criterio temporal para ver sus resultados en marea viva o muerta,
- o elegir sólo los datos en cierto período con tormenta.

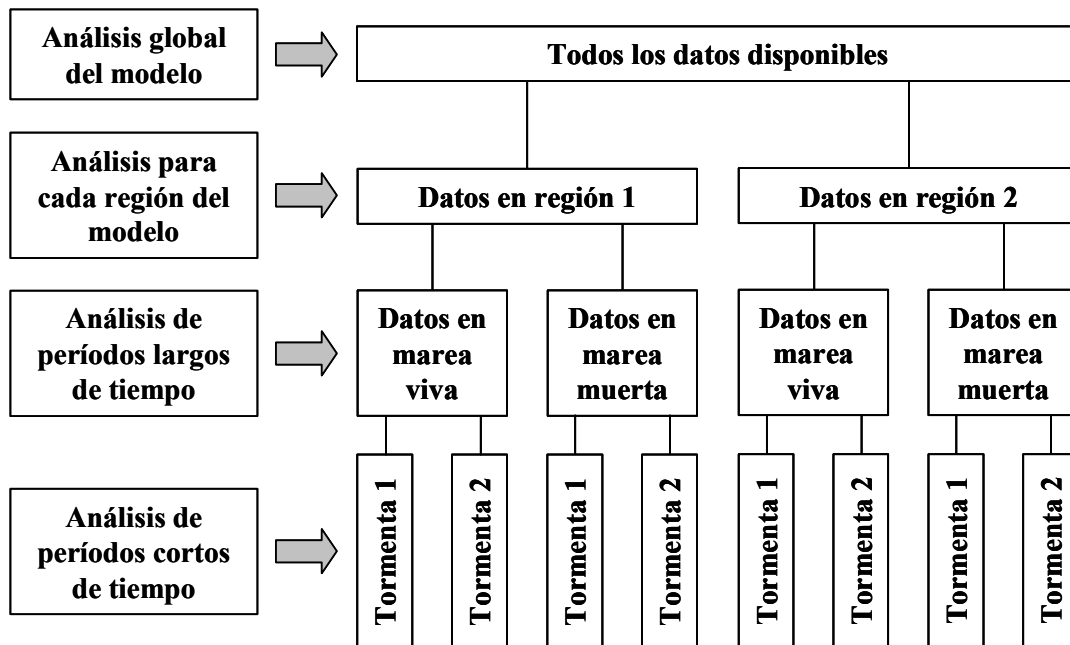


Figura 6. Ejemplos de selección de datos durante el desarrollo de un modelo numérico hidrodinámico

En resumen, en el análisis estadístico, el usuario debe tener libertad, utilizando criterios espaciales y temporales, para seleccionar el número y tipo de datos usados en las tablas del SSD.

## 6. CONCLUSIONES

Los avances tecnológicos en la última década en el campo de los modelos numéricos hidrodinámicos y de los equipos de medición permiten realizar hoy en día el desarrollo de dichos modelos con numerosos datos de campo, produciendo nuevos desafíos para su procesamiento y análisis. Nuevas tecnologías, como los Sistemas de Soporte de Decisiones (SSD), prometen disminuir el tiempo y facilitar al investigador el desarrollo de dichos modelos integrando adecuadamente los resultados numéricos y las mediciones in situ.

A pesar de las dificultades para integrar los diferentes tipos de datos y la carencia de un procedimiento único para el desarrollo de modelos, se pueden definir unas fases y pasos básicos para el desarrollo de modelos numéricos hidrodinámicos y las características generales que debe tener un SSD para ayudar al investigador en esta actividad.

El desarrollo de un modelo numérico tiene cuatro fases básicas: el análisis de sensibilidad, la calibración, la validación y la aplicación. Cada una de estas fases tiene varios pasos en los que la información utilizada se procesa y el modelo se mejora hasta ser capaz de reproducir el fenómeno que se estudia.

Las características que deben tener los componentes de un SSD para el desarrollo de modelos se pueden definir con este procedimiento básico. Los componentes de un SSD son: la interfaz, la base de datos y los modelos. La interfaz interactúa con el usuario y permite la integración de todos los componentes. La base de datos almacena la información disponible, si bien para el caso de modelos hidrodinámicos, no es necesaria una base de datos muy robusta; y se utiliza principalmente para darle versatilidad al investigador en la selección de los tipos de

datos que serán empleados en los diferentes tipos de análisis. El énfasis del SSD debe estar en sus modelos para que permitan procesamiento y análisis de resultados numéricos y datos medidos, teniendo siempre presente versatilidad para que el usuario defina el tipo y el orden en el análisis de acuerdo con cada situación específica.

Un SSD para el desarrollo de modelos numéricos hidrodinámicos debe facilitar la comparación de niveles de agua y velocidades de flujo, que son usualmente las características utilizadas para la evaluación de los resultados numéricos.

Debido a que los datos utilizados en el desarrollo de modelos hidrodinámicos dependen enormemente de su ubicación en el espacio, un sistema de información geográfica (SIG), utilizado como un generador de software, trae enormes ventajas al SSD. El problema de un SIG para el desarrollo de modelos es que no está completamente desarrollado para el análisis de datos dinámicos. La preocupación es con su habilidad para analizar tendencias en el tiempo de datos espaciales.

Por último, hoy en día el SSD debe estar adaptado para ayudar en el desarrollo de modelos con la metodología del tanteo, ampliamente usada. Aunque esta metodología es tediosa, consume mucho tiempo de computación y se basa en la experiencia del modelador y su juicio, Toro (2003) muestra cómo disminuir el tiempo resumiendo y combinando datos medidos y modelados. Como Palacio (2002) lo especifica, ha habido recientemente mayor interés y un esfuerzo en el desarrollo de herramientas de calibración semiautomáticas que permitan estructurar el proceso de calibración (tal como el "adjoint model", v. gr. Chavent [1980], Verlaan et al. [1996]). Sin embargo, estas herramientas tienen la desventaja de que podrían generar una distribución artificial del fenómeno físico en el espacio, ya que la distribución de los parámetros es determinada por las figuras geométricas de las áreas aferentes del campo de mediciones. Este tipo de herramientas puede ser aplicado con éxitos en grandes modelos, pero no en pequeños modelos a escala.



## 7. BIBLIOGRAFÍA

- ABEBE, A. J. and Price, R. K., 2002. Decision support system for flood warning in urban areas. Proceedings of the XXIX IAHR Congress, Beijing, China, Sept 16-21, 2001.
- AIAA, 1998. Guide for the verification and validation of computational fluid dynamics simulations (G-077-1998) AIAA Standards ISBN 1-56347-354-2.
- ANDREU, J., Solera, A. and Paredes, J., 2002. Decision support system for integrated water resources planning and management. Northern Environmental Research Network, University of Oulu, Finland. In URL: [www.nornet.oulu.fi/noriba/finlan.pdf](http://www.nornet.oulu.fi/noriba/finlan.pdf).
- BONCZEK, R. H., Holsapple, C. W. and Whinston, A. B., 1980. Future directions for developing decision support systems. *Decision Sciences*, Vol. 11 (1), 616-631.
- CHAVENT, G., 1980. Identification of distributed parameter systems: about the output least square method, its implementation, and identifiability. In: 5<sup>th</sup> IFAC symposium on identification and system parameter estimation proceedings, Vol. I, R. Iserman (Ed.), New York: Pergamon Press, pp. 85-97.
- 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.
- DEE, D. P., Cunge, J., Labadie, G., Ruiz Mateo, A., Mathiesen, M., Price, R., Santos, M., Warren, R., 1994. Guidelines for documenting the validity of computational modelling software, Special publications. International Association for Hydraulic Research, Delft, The Netherlands.
- FOKKING, R. J., Karssen, B., and Wang, Z. B., 1998. Morphological modelling of the Western Scheld Estuary. *Physics of estuaries and coastal seas*. Dronkers & Scheffer.
- FU, P., RICH, P., Wang, J., 2000, Integration of GIS with user models. Paper presented at ESRI User Conference 2000, San Diego, California.
- HARRIS, J., Gupta, S., Woodside, G. and Ziemba, N., 1993, Integrated use of a GIS and a three-dimensional, finite-element model: San Gabriel basin groundwater flow analyses. In: *Environmental Modeling with GIS*; M. Goodchild, B. Parks and L. Steyaert, Oxford University Press, pp. 168-172. ISBN: 0195080076.
- KEENAN, P., 1997. Geographic Information Systems their contribution to the IS mainstream. Presented at Association for Information Systems 1997 Americas Conference. Indianapolis, USA.
- KEENAN, P., 1998. Spatial Decision Support Systems: Extending the technology to a broader user community, Presented at IFIP TC8.3 in Bled, Slovenia, July 1998, published in proceedings supplement volume p. 21-30.
- KUKURIC, N., 1999. Development of a decision support system for groundwater pollution assessment, 220pp., ISBN: 90 5410 418 X.
- METHA, U. B., 1995. Guide to credible computational fluid dynamics simulations, AIAA Paper 95-2225, June 1995.
- NOAA, 1999. NOS Procedures for developing and implementing operational nowcast and forecast systems for PORTS. NOAA Technical Report NOS CO-OPS 0020, January 1999, Silver Spring, Maryland, USA.
- OLIVEIRA, R., RIBEIRO DA COSTA, J., 2000. An environmental information system linking time series with GIS. Proc. ESRI International Users Conference 2000, San Diego, USA.
- 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. Disertación de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- POWER, D. J., 1997. "What is a DSS?". In: *DS, The on-line executive journal for data-intensive decision support*, October 21, 1997: Vol. 1, No. 3.
- ROACHE, P. J., 1998. Verification and validation in computational science and engineering. Hermosa, Albuquerque, 446p.
- SCHMALZ, R., 1999. Experimental Galveston Bay/Houston ship channel nowcasting/forecasting system. Houston Ship Channel Survey, NOAA, Silver Spring Maryland, USA.
- SCHMALZ, R., 2001. One-year assessment of a nowcast/forecast system for Galveston Bay. Fourth Conference on Coastal Atmospheric and Ocean Prediction, American Meteorological Society, Nov. 2001.
- TORO, F., 2003. A decision support system for the development of hydrodynamic numerical models. Research and Technology Centre West-Coast, Christian Albrechts University. Report No. 32. Kiel, Germany.
- WARD, M., Craig, S., and Spaulding, M., 2001. A nowcast/forecast system of circulation dynamics for Narragansett Bay. Fourth Conference on Coastal Atmospheric and Ocean Prediction, American Meteorological Society, Nov. 2001.
- WL Delft Hydraulics, 2002: A generic DSS for flood management and landscape. In URL: <http://wldelft.nl/rnd/proj/topic/generic-dss>. (28.11.2002).