

**ACTUALIDAD Y PERSPECTIVAS  
DE LA HIDRAULICA COMPUTACIONAL**

**Angel N. Menéndez  
Laboratorio de Hidráulica Aplicada  
INCYTH  
Ezeiza - Argentina.**

**RESUMEN**

Se describe el marco de referencia de la Hidráulica Computacional, y se discuten brevemente aspectos de algunas de sus temáticas más importantes. En particular, se explican aquellas metodologías que están siendo utilizadas en el Laboratorio de Hidráulica Aplicada del INCYTH para desarrollar sistemas computacionales para estudios ingenieriles. Se plantean las probables líneas de evolución futura de esta especialidad.

**ABSTRACT**

The framework of Computational Hydraulics is described and the main features of a few of its subjects are briefly discussed. Emphasis is placed on the methodologies used at the Laboratorio de Hidráulica Aplicada of INCYTH to develop computational systems for engineering studies. The probable future evolution of Computational Hydraulics is described.

## UNA BREVE RESEÑA HISTORICA

La Hidráulica y la Mecánica de los Fluidos o Hidrodinámica nacen como dos disciplinas independientes. La primera, de mayor data, apunta a resolver cuestiones prácticas. En consecuencia es esencialmente experimental, por lo cual incorpora un rico arsenal de conocimiento empírico, mucho del cual se sigue utilizando hasta el presente. La segunda, en cambio, se conforma como ciencia exacta, por lo cual su esencia es teórica, apuntando a resolver problemas idealizados. La Hidráulica moderna nace del contacto entre ambas disciplinas. Básicamente, a través de la incorporación a la Hidráulica de los conocimientos desarrollados por la Mecánica de los Fluidos.

Este proceso, que se da a lo largo de un siglo, conforma una relación en la cual la Hidráulica provee los resultados cuantitativos a través de ensayos en modelo físico, mientras que la Mecánica de los Fluidos ayuda a la correcta implementación de los ensayos experimentales y aporta la interpretación cualitativa de los resultados. Los grandes Laboratorios de Hidráulica a nivel mundial se desarrollan a partir de esta relación, que llega a su clímax en la década del sesenta.

Ya por entonces, está asentada la incorporación de la computadora al cálculo de problemas hidrodinámicos. A decir verdad, la Hidrodinámica Computacional se convierte en uno de los motores del desarrollo de métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales. Su irrupción en la Hidráulica conduce a desarrollar los primeros modelos matemáticos de aplicación "industrial". La década del setenta es la del asentamiento de la nueva herramienta, que comienza a ser aplicada, muchas veces con carácter experimental, a una gran cantidad de problemas hidráulicos. Comienza ya a desplazar a los modelos físicos de tareas que, hasta entonces, le estaban reservadas.

En la presente década, la "modelación matemática" se instala definitivamente dentro del ambiente hidráulico como la herramienta principal para diagnóstico de situación y diseño de obras de arte, a tal punto que esa es la principal actividad en los más importantes laboratorios del mundo. En efecto, a un grado similar de confiabilidad, la modelación matemática resulta más eficiente en cuanto a costos y tiempos de ejecución. Al presente, se habla de que se está forjando una nueva rama dentro de la Hidráulica, con sus propias reglas y dificultades: la Hidráulica Computacional (1,2). Ella no solo requiere del uso sistemático de técnicas de base científica, sino que también involucra aspectos del arte de modelar, una extensión del famoso "sano criterio ingenieril".

Si bien este avance de la simulación numérica conlleva un desplazamiento de los estudios en modelo físico, éstos están lejos de su desaparición, ya que aún existen obstáculos de dos tipos. Por un lado, subsisten irresueltos algunos problemas básicos de la Mecánica de los Fluidos. Por otro lado, los equipos de computación actuales aún no son suficientes, por capacidad y memoria, para procurar una simulación detallada de algunos fenómenos.

El principal problema teórico irresuelto es el de la turbulencia. Si bien se han desarrollado una cantidad de tratamientos, realimentados con información experimental, aptos para estudios ingenieriles, es sabido que esos tratamientos resultan incapaces de forjar un modelo cerrado del fenómeno. De todos modos, frente al tipo de requerimientos de la ingeniería hidráulica actual, éstos se utilizan con confiabilidad en la simulación de los efectos de la turbulencia de gran escala, cuando puede hacerse abstracción de las variaciones en algunas de las dimensiones espaciales. Aún no resulta prácticamente viable proceder a simulaciones tridimensionales para resolver las escalas menores de movimiento. Precisamente, la modelación física tiene hoy día uno de sus principales reductos en la simulación de fenómenos turbulentos de pequeña escala (fenómenos esencialmente tridimensionales).

Dada esta situación, ha surgido una complementación entre ambos tipos de técnicas. En general, la modelación matemática da una descripción global del movimiento y provee las condiciones de borde para modelos físicos de detalle. No es fácil pronosticar si este estado de situación constituye un equilibrio estable para los próximos años, dado el vertiginoso avance técnico a nivel de equipos de computación que puede hacer posible en un futuro cercano proceder a simulaciones tridimensionales de detalle. En todo caso, ésta es la tónica que impera en los estudios actualmente en ejecución.

#### LOS TEMAS DE LA HIDRAULICA COMPUTACIONAL

Si bien un observador externo puede confundirlo, existe una diferencia marcada entre lo que se denomina actualmente Mecánica de los Fluidos Computacional y la Hidráulica Computacional. En efecto, la primera, asociada en la práctica a estudios Aerodinámicos (es decir, a la industria de la Aeronavegación comercial y militar), apunta básicamente a desarrollar un algoritmo más confiable y eficiente para resolver las Ecuaciones de Navier-Stokes. En cambio, la Hidráulica Computacional (ligada al diseño de estructuras hidráulicas y a la planificación y administración de sistemas hídricos) es temáticamente mucho más rica, aunque soporta, en general, mucho más margen de error en sus resultados, por lo cual

puede hacer uso de métodos numéricos más simples. Escencialmente, la Hidráulica Computacional aspira a desarrollar algoritmos para describir los distintos problemas hidráulicos. Es decir, no genera un único sujeto, sino un abanico de herramientas que, en general, se complementan unas a otras. Lo que sucede es que los fenómenos de interés de la Hidráulica abarcan un amplio espectro de escalas. Van desde movimientos a escala geofísica (corrientes marítimas, ondas de marea, ondas de inundación en ríos) hasta problemas de flujo en tuberías (dispositivos hidromecánicos).

Además, en la naturaleza suelen estar presentes simultáneamente una variedad importante de fenómenos de distinta escala. Lo más eficiente resulta efectuar tratamientos separados a fenómenos de escalas disímiles. Esto conduce a un problema típico de la Hidráulica Computacional: la parametrización de los efectos de las escalas no resueltas por el análisis (mucho menores que la principal) y la generación de datos referidos a las escalas mucho mayores que las resueltas. Se generan así una variedad inmensa de problemas matemáticos distintos (aparecen ecuaciones diferenciales hiperbólicas, parabólicas, elípticas), cada uno de los cuales tiene asociado su propio marco teórico físico. Cada problema requiere un tratamiento numérico especial. Esto último conduce a que deban utilizarse prácticamente todas las técnicas numéricas (diferencias finitas, elementos finitos, elementos de contorno, etc.).

La siguiente es una lista de temas importantes de la Hidráulica Computacional. Esta lista no es, de ninguna manera, exhaustiva, pero indica áreas donde se han producido desarrollos importantes a nivel mundial, y en la cual se encuentra activo el Laboratorio de Hidráulica Aplicada (LHA) del INCYTH.

- i) Traslación de ondas de inundación en ríos y canales
- ii) Corrientes cuasi-bidimensionales en cuencos
- iii) Transformación de olas en las zonas costeras
- iv) Dispersión de contaminantes
- v) Transporte de sedimentos

En lo que sigue, se efectuará un repaso de cada uno de estos temas, describiéndose las características físicas más importantes de los fenómenos asociados, las técnicas numéricas adoptadas para la simulación y las aplicaciones de los sistemas computacionales desarrollados.

## TRASLACION DE ONDAS DE INUNDACION EN RIOS Y CANALES

La simulación numérica de ondas de inundación en cursos fluviales fue un problema pionero de la Hidráulica Computacional. Las crecidas naturales que se producen puede ser, básicamente, de dos tipos. Unas están ligadas a la alimentación del río (lluvias, deshielos), y constituyen ondas de inundación tipo campana, relativamente extendidas, que avanzan hacia la desembocadura mientras se atenúan suavemente ("ondas cinemáticas") [3]. Otras, que se da cuando el curso fluvial desemboca en el mar o en un estuario, están producidas por las mareas (astronómicas y "meteorológicas"), y se manifiestan como ondas periódicas de retroceso de rápida atenuación y de extensión menor a la de las primeras ("ondas gravitatorias largas") [4].

Las ondas cinemáticas surgen de la acción combinada de los siguientes mecanismos físicos: el peso efectivo de las partículas de fluido, la resistencia hidráulica ("fricción") y, en menor proporción, el gradiente de presiones. En las ondas gravitatorias largas, en cambio, se da el balance entre el gradiente de presiones y la inercia [5,6]. Ambos tipos de oscilaciones pueden ser descriptas, en términos de un análisis unidimensional, por medio de las Ecuaciones de Saint Venant (7,8):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = g (I_0 - I_f) + \frac{q u_1}{\Omega} \quad (2)$$

donde  $t$  es el tiempo,  $x$  la coordenada longitudinal,  $Q$  el caudal,  $\Omega$  la sección transversal,  $u$  la velocidad media,  $h$  el tirante,  $I_0$  la pendiente de fondo,  $I_f$  la pendiente de fricción,  $q$  el aporte lateral,  $u_1$  la componente longitudinal de la velocidad del aporte lateral y  $g$  la gravedad. La Ec. (1) expresa la conservación de la masa (ecuación de continuidad), mientras que la Ec. (2) la conservación de la cantidad de movimiento en la dirección del escurrimiento.

El sistema de ecuaciones (1)-(2) es cuasi-lineal y de tipo hiperbólico. Para su resolución necesita de condiciones iniciales para el caudal y el nivel, y de dos condiciones de borde. Cuando el régimen de escurrimiento es subcrítico ( $F < 1$ , donde  $F = u/[g\Omega/B]^{1/2}$  el número de Froude, siendo  $B$  el ancho superficial) deben

especificarse una condición en cada extremo del tramo representado. En cambio, cuando el régimen es supercrítico ( $F > 1$ ) ambas condiciones deben establecerse en el borde de aguas arriba (4,7).

En la mayoría de las aplicaciones prácticas el régimen de escurrimiento es subcrítico. El método numérico universalmente adoptado para resolver este problema es el esquema de diferencias finitas de Preissman. Este es un esquema tipo caja (en el plano  $x-t$ ), centrado en la dirección  $x$  y levemente adelantado en la dirección  $t$  para hacerlo más estable. Utilizando una técnica iterativa de tipo Picard, produce, para cada iteración, un sistema de ecuaciones algebraicas lineales de tipo tridiagonal en bloque que se puede resolver eficientemente mediante algoritmos de eliminación (9,10).

Mediante extensiones al modelo teórico original, pueden incorporarse a la simulación las planicies de inundación (que presentan, en general, una rugosidad mayor que el cauce principal), las pérdidas energéticas locales (expansiones, contracciones, curvas) y las estructuras (puentes, vertederos, alcantarillas, etc.). Estas últimas constituyen una singularidad del modelo teórico, que puede representarse desdoblado el nodo de cálculo y aplicando la ley de funcionamiento de la estructura. En el LHA se ha desarrollado el sistema EZEIZA IV, que tiene incorporada todas estas opciones (11).

En los casos de bifurcación en el curso de un río, de la confluencia de dos ríos de caudal similar, o del establecimiento de una red de canales (típicamente un delta), debe resolverse el sistema completo de escurrimiento. Para ello deben especificarse condiciones de compatibilización en los nodos, que, físicamente, representan la conservación de la masa y el balance energético. Si bien esto no complejiza el planteo matemático, conduce a algoritmos mucho más elaborados para construir la representación discreta del problema, e implica tiempos de procesamiento mucho mayores (9). El sistema EZEIZA V del LHA es una extensión del EZEIZA IV a problemas de redes de canales.

Otro tipo de ondas que se producen en ríos y canales son las que resultan de la operación de estructuras construidas por el hombre -- presas, compuertas, etc. --, que caen dentro del tipo de ondas de gravedad. Estas determinan, al menos durante la primera etapa de propagación, situaciones de movimiento altamente impermanente. A esta categoría pertenece también la clásica onda de rotura de presas. En muchos casos se produce, por efectos no lineales, la formación de un frente de onda abrupto, que matemáticamente se representa como una singularidad conocida como onda de choque (4). La simulación numérica de este fenómeno se lleva a cabo,

generalmente, partiendo de la forma conservativa de las ecuaciones de movimiento y utilizando métodos disipativos. Es precisamente la difusión numérica la que contrabalancea el efecto no lineal de distorsión (o dispersión de amplitudes), produciendo un frente de onda relativamente abrupto (el salto se da sobre aproximadamente tres celdas de cálculo) [12]. En el LHA se ha desarrollado el sistema SV III, que es capaz de simular este tipo de movimientos [13].

En la actualidad, este tema se considera básicamente formulado en sus esencias. Los aportes de la investigación se limitan a mejoras en los algoritmos (incluida su adaptación a computadoras personales), formulaciones especiales para casos particulares, etc.

El LHA ha participado en una variedad de estudios de ingeniería en donde se han utilizado estas herramientas. Entre los más importantes figuran: Río Alto Paraná, Río Uruguay, Río Negro y Río Gualeguay, donde se utilizó el sistema EZEIZA III [14] (antecesor del EZEIZA IV); Río Paraná Medio, Río Limay y Río Negro donde se utilizó el sistema REDES [15] (antecesor del EZEIZA V); rotura de presas en el Río Mendoza, donde se utilizó el SV III [13] (Figs. 1 y 2), e inundaciones del Río Reconquista, donde se está utilizando el sistema EZEIZA V.

#### CORRIENTES CUASI-BIDIMENSIONALES EN CUENCOS

El movimiento de gran escala de las aguas en estuarios o en zonas marítimas costeras está afectado por las mareas, las cuales generan flujos cuasi-bidimensionales o en aguas poco profundas (es decir, la escala vertical del movimiento es mucho menor que las horizontales). El mismo carácter tiene el flujo en tramos fluviales para escalas de movimiento comparables al ancho del río. La diferencia esencial entre ambas situaciones es que la primera presenta un alto grado de impermanencia, mientras que la segunda puede ser considerada como cuasi-estacionaria.

Este tipo de fenómenos puede ser descrito por medio de las Ecuaciones de Saint Venant en dos dimensiones espaciales (o ecuaciones para aguas poco profundas) [10]:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uh) + \frac{\partial}{\partial y} (vh) = 0 \quad (3)$$

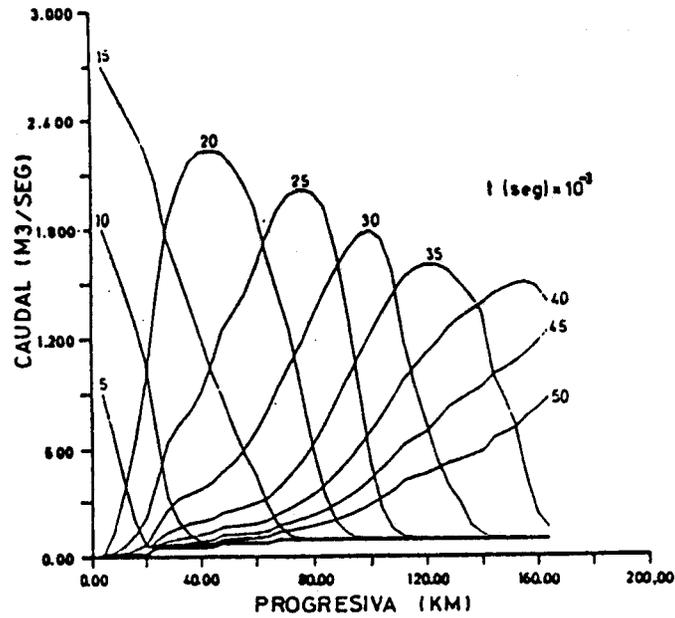


Figura 1. Onda provocada por la rotura del dique natural de hielo sobre el Río del Plomo (Mendoza).

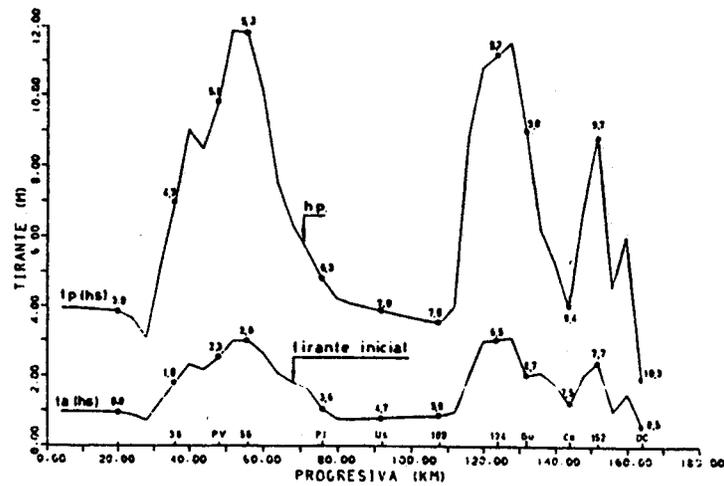


Figura 2. Mapa de inundación de la onda de rotura del dique del Plomo (hp: tirante pico).

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial}{\partial x} (h + z_0) =$$

$$\frac{1}{\rho h} \left( \tau_{sx} - \tau_{fx} + \frac{\partial}{\partial x} (h T_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h T_{xy}) \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial}{\partial y} (h + z_0) =$$

$$\frac{1}{\rho h} \left( \tau_{sy} - \tau_{fy} + \frac{\partial}{\partial x} (h T_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (h T_{yy}) \right) \quad (5)$$

donde  $t$  es el tiempo,  $x$  e  $y$  las coordenadas horizontales,  $h$  el tirante,  $z_0$  la cota de fondo,  $u$  y  $v$  las componentes de la velocidad,  $\tau_{sx}$  y  $\tau_{sy}$  las componentes de la tensión por el viento,  $\tau_{fx}$  y  $\tau_{fy}$  las componentes de la tensión de corte en el fondo,  $T_{xx}$ ,  $T_{xy}$ ,  $T_{yx}$  y  $T_{yy}$  las componentes del tensor de las tensiones efectivas (viscosas, turbulentas y convectivas),  $g$  la gravedad y  $f$  el parámetro geotrófico. La Ec. (3) expresa la conservación de la masa, mientras que las Ecs. (4) y (5) la conservación de la cantidad de movimiento en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente.

En el caso en que la vorticidad generada en las costas permanece adherida, es decir no hay desprendimiento de la capa límite, y la curvatura de las líneas de corriente es pequeña frente a la profundidad, las tensiones efectivas pueden despreciarse y el sistema de ecuaciones es hiperbólico. Sobre los contornos cerrados (costas) se impone la condición de impenetrabilidad. El tratamiento para los bordes abiertos depende del régimen de escurrimiento y de la dirección del flujo. En general, se trata de régimen subcrítico. En esta situación, deben especificarse dos condiciones de contorno si el borde es entrante y una si es saliente [16].

El tratamiento numérico clásico dado a las Ecs. (3) a (5) es su discretización por un método de diferencias finitas de direcciones alternadas, que desacopla, en cada paso fraccionario, las ecuaciones para distintas filas o columnas, permitiendo una resolución más eficiente. Debido a los términos no lineales deben implementarse tratamientos iterativos. Las derivadas espaciales se toman centradas, salvo las correspondientes a los términos convectivos, que requieren algún grado de atraso espacial para que el esquema permanezca estable [17,18].

En situaciones prácticas es importante poder simular bordes genuinamente abiertos, en el sentido de que simplemente dejen pasar hacia afuera del dominio de cálculo toda la información que llega a ellos desde el interior. Matemáticamente, esto significa que, en lugar de especificar el valor de una magnitud, debe darse una relación funcional entre magnitudes. En problemas de mareas, la absorción total de las ondas que inciden sobre ese borde puede simularse fijando el invariante de Riemann correspondiente al plano característico entrante [19]. En cambio, en problemas fluviales puede especificarse, directamente, la relación altura-caudal en ese contorno.

Cuando se produce la separación de alguna capa límite se genera una zona de recirculación donde las tensiones efectivas son apreciables. El aporte básico proviene de la turbulencia. Este efecto se lo representa como un fenómeno de difusión, con un coeficiente de difusividad que depende de las condiciones locales del movimiento. En estudios ingenieriles, este coeficiente puede ser determinado por medio de una "calibración" del modelo matemático. Mayor generalidad tienen los planteos que determinan dicho coeficiente en base a escalas de longitud y velocidad del movimiento turbulento, las cuales tienen sus propias ecuaciones de evolución. Estas determinan el "modelo" de turbulencia que se adopta. El más difundido, por combinar una relativa universalidad con un grado de complejidad manejable, es el denominado "K- $\epsilon$ " [20].

En el caso de estudiarse zonas muy localizadas, en las cuales no hay espacio suficiente para que se desarrollen los efectos acumulativos (resistencia y Coriolis), y en ausencia de vientos y zonas de recirculación, el flujo se comporta, esencialmente, como potencial, lo cual conduce a una formulación matemática notablemente más simple [21].

En el LHA se ha desarrollado el sistema computacional HIDROBID II, basado en las Ecs. (3) a (5), el cual tiene incorporada todas las opciones de bordes abiertos mencionadas [18]. Este sistema ha sido ampliamente utilizado en estudios ingenieriles y de investigación. Con ese propósito se han efectuado simulaciones del movimiento en el Río Paraná en la zona de Corpus, de Yacyretá (Fig. 3) y del Delta del Paraná, y en el Río de la Plata en su totalidad (Fig. 4) y en una región localizada. Actualmente se trabaja en su aplicación a la Ría de Bahía Blanca.

En la actualidad, esta herramienta es aceptada como confiable en la ingeniería hidráulica, a tal punto que ha desplazado casi totalmente a los modelos físicos. La investigación continúa apuntando a obtener algoritmos más precisos, e incorporando a la simulación situaciones más complejas.

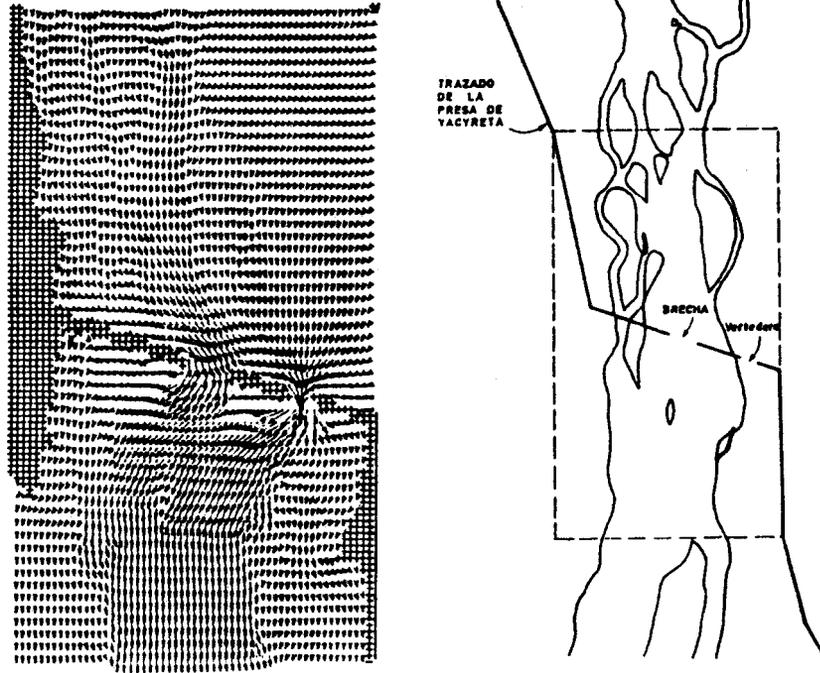


Figura 3. Corrientes debido al cierre del Brazo Aña-Cuá del Río Paraná por la construcción de la presa de Yacyretá.

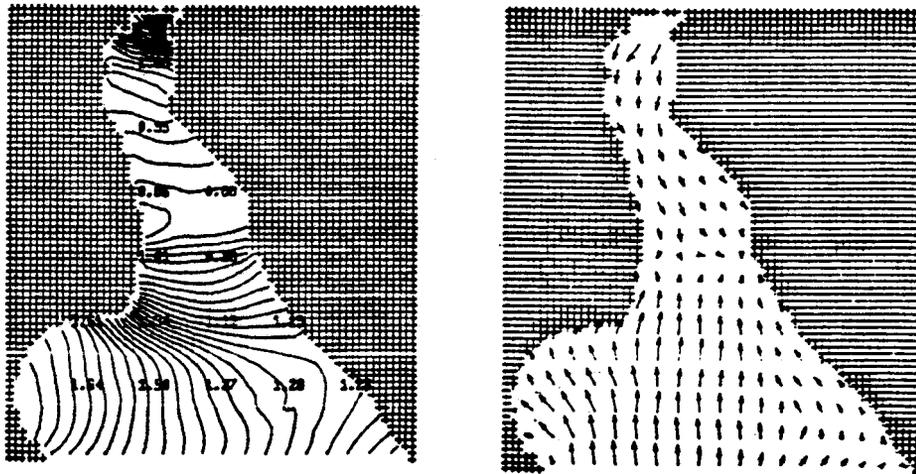


Figura 4. Onda de marea en el Río de la Plata.

### TRANSFORMACION DE OLAS EN ZONAS COSTERAS

Las olas, generalmente producidas por la acción del viento en zonas de mar abierto, sufren transformaciones significativas cuando se aproximan hacia las regiones costeras. La disminución de profundidad produce los fenómenos de refracción y bajío. El primero implica una desviación en la dirección de propagación de los frentes de onda, que tienden a hacerse paralelos a la línea de costa. El segundo está asociado a la disminución de la longitud de onda de las olas, que produce, como contrapartida, un aumento en su amplitud. Al interactuar con estructuras (muelles, puertos), aparecen fenómenos de reflexión y difracción. Estos últimos están asociados a cambios significativos de la amplitud de las olas sobre distancias comparables a su longitud de onda [22].

Un modelo teórico abarcador de todos estos efectos fue formulado por Berkhoff, y se sintetiza en la ecuación (bidimensional) para taludes suaves [23]

$$\nabla \cdot (c c_g \nabla \phi) + \frac{c_g}{c} \omega^2 \phi = 0 \quad (6)$$

que se complementa con la relación de dispersión

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (7)$$

donde  $\nabla$  es el operador gradiente en el plano  $(x,y)$ ,  $\phi$  el potencial de velocidades,  $\omega$  la frecuencia angular,  $k$  el número de ondas,  $c$  la velocidad de fase,  $c_g$  la velocidad de grupo,  $h$  la profundidad y  $g$  la gravedad. La Ec. (6) es de tipo elíptico, y necesita de una condición de borde a lo largo de todo el contorno del dominio de cálculo. Sobre contornos reflejantes se impone la condición de impenetrabilidad. También es necesario simular bordes abiertos no reflejantes y parcialmente reflejantes (como se comportan las estructuras no estrictamente rígidas), lo cual puede lograrse imponiendo una adaptación de la condición de radiación de Sommerfeld [24]. Más compleja es la representación de bordes abiertos de radiación que permitan tanto la entrada (onda incidente) como la salida (onda irradiada) de información. Esto puede realizarse introduciendo integrales de contorno que involucran distribuciones de fuentes [23].

Previo a su discretización, el espacio se divide en dos partes: un dominio interior, donde se concentra la zona de interés, y uno exterior, desde donde proviene la ola incidente. La separación entre ambos dominios es un

contorno de radiación. En el dominio interior se utiliza el método de los elementos finitos, mientras que la integral de contorno se trata con el método de los elementos de contorno [23,25].

La teoría lineal de Berkhoff pierde consistencia cerca de la rompiente. En efecto, el rompimiento de olas es un fenómeno estrictamente no lineal. Una manera de evitar esta dificultad es considerar a la rompiente como un contorno absorbente, lo cual permite aún resolver el problema en la zona de interés.

La formulación de Berkhoff conduce a problemas algebraicos de gran magnitud, ya que es necesario resolver con relativa precisión la extensión de cada ola. Si bien hay problemas en los cuales no es posible evitar este costo (típicamente, resonancia en puertos), es factible (y necesario desde el punto de vista práctico) efectuar simplificaciones cuando existe una dirección definida de propagación de los frentes de ola y pueden despreciarse los efectos del "scattering" hacia atrás. Esto permite transformar al problema en parabólico, pasando a ser la dirección de propagación una coordenada de marcha [26,27].

En el LHA se ha desarrollado el sistema DIFRAC, basado en el modelo de Berkhoff, el cual se ha verificado para problemas de resonancia en puertos (Figs. 5 y 6). Actualmente se encuentra en pleno desarrollo el sistema SCATTER, en base al modelo parabólico (aunque también introduce corrientes de base), cuya aplicación al estudio de la Ría de Bahía Blanca está prevista.

La investigación actual sobre el tema está muy dirigida a enriquecer la formulación parabólica, que es de gran interés práctico ya que está llamada a reemplazar a las clásicas técnicas de propagación de olas por el método de los rayos (en analogía con la óptica geométrica), la cual presenta muchas dificultades de orden práctico.

#### DISPERSION DE CONTAMINANTES

Los contaminantes vertidos en un curso de agua son transportados por la corriente, produciéndose una variedad de fenómenos. En primer lugar, éstos son arrastrados por la corriente media. Este mecanismo de transporte es, en general, descompuesto en un transporte medio sobre la vertical (advección) y en uno diferencial por el gradiente de velocidades vertical (advección diferencial). Dado que, en general, la descripción hidrodinámica se basa en modelos integrados en la vertical, la advección puede representarse directamente. En cambio, el efecto de la advección diferencial es necesario modelarlo, utilizándose una ley de Fick que

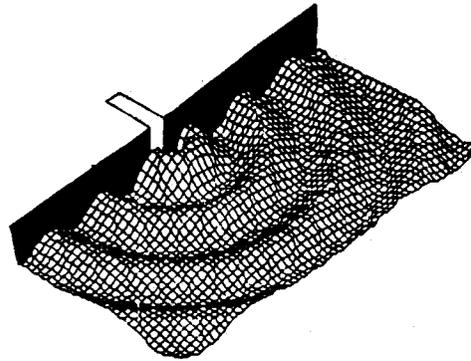
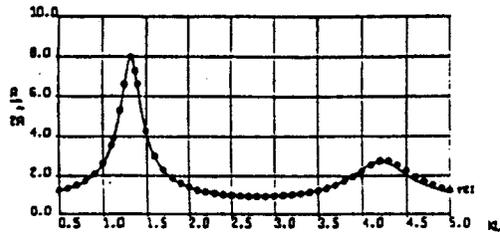


Figura 5. Resonancia en un puerto rectangular. Comparación entre solución analítica y numérica, y vista tridimensional.

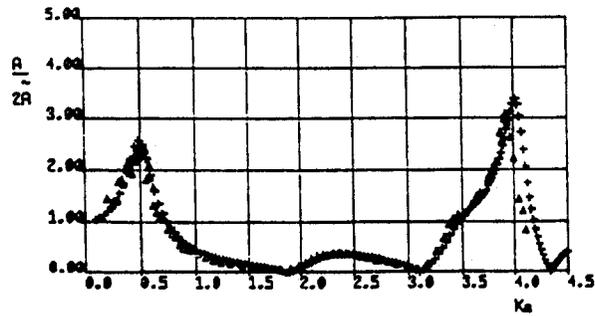


Figura 6. Resonancia en un puerto circular. Comparación entre datos experimentales y solución numérica.

implica un proceso de difusión. Finalmente, el transporte turbulento, relevante sobre todo en la dirección transversal a la corriente media, también puede ser representado como un proceso de difusión. Al efecto combinado de la advección diferencial y la difusión turbulenta se lo denomina genéricamente "dispersión" (nombre poco afortunado por su acepción en Física, que debe entenderse como "desparramamiento") [28].

El contaminante suele considerarse pasivo, en el sentido de que no afecta a la hidrodinámica, la cual puede tomarse, entonces, como un dato a los fines del análisis del proceso de dispersión. Además, el contaminante puede ser de naturaleza orgánica, en cuyo caso hay que especificar una ley de decaimiento.

Mediante un análisis bidimensional en planta, se obtiene la siguiente ecuación para la evolución de la concentración del contaminante [29]

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( h K_{11} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( h K_{12} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( h K_{21} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h K_{22} \frac{\partial c}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

donde  $t$  es el tiempo,  $x$  e  $y$  las coordenadas horizontales,  $c$  la concentración media vertical,  $h$  el tirante,  $u$  y  $v$  las componentes de la velocidad y  $K_{ij}$  el tensor de difusividad.

En general, el proceso de advección es dominante, por lo cual la zona contaminada se concentra en penachos relativamente delgados. En este caso la distribución de concentraciones tiene una naturaleza gaussiana. Es posible adoptar, en consecuencia, una descripción simplificada en términos de unidades elementales denominadas "manchas". Estas son distribuciones gaussianas, que quedan totalmente descriptas si se especifican la posición de su centro, su orientación y las desviaciones estándar en ambas direcciones principales. De la Ec. (8) surgen las ecuaciones para la evolución de cada una de estas magnitudes. Un vertido continuo de contaminante se representa, entonces, mediante la superposición de manchas [29].

Para la resolución numérica de la evolución de la concentración es necesario tener en cuenta que debe

reducirse a un mínimo la difusión numérica proveniente de la discretización de los términos convectivos, ya que, dada la naturaleza predominantemente advectiva del fenómeno, ésta puede alcanzar fácilmente valores comparables a la difusión física real producto del fenómeno de dispersión. Una técnica eficaz consiste en desdoblarse ("splitting"), efectuando cálculos sucesivos de la advección, la difusión y el decaimiento, y utilizando para cada uno de ellos el método numérico más efectivo. Para la advección puede utilizarse el método de las características y, eventualmente, una técnica precisa de interpolación (por ejemplo, interpolación de Hermite) (29).

En el LHA se ha desarrollado el sistema MANCHAS (30), basado en el concepto de manchas enunciado más arriba. Este ha sido utilizado para estudiar el efecto contaminante de los residuos cloacales de la ciudad de Buenos Aires, que son vertidos en el Río de la Plata mediante un efluente submarino (Fig. 7).

Los límites a las posibilidades de simulación numérica del fenómeno de dispersión de contaminantes se encuentran, en la actualidad, más en la mejor formulación de modelos teóricos y en el avance de técnicas de medición en campaña que en los aspectos numéricos del problema.

#### TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

La interacción entre el agua que fluye y el terreno sobre el cual fluye es, en general, dinámica. En efecto, superada una cierta velocidad crítica, el movimiento del fluido es capaz de poner en movimiento granos del material del fondo. Estos ruedan, se deslizan o saltan, dentro de una fina capa de fluido cercana al lecho (capa de fondo). Eventualmente, dependiendo, entre otras cosas, del tipo de suelo, los granos pueden ponerse en suspensión debido a la acción de los torbellinos, y ser transportados a grandes distancias antes de volver a deponerse por acción de su peso efectivo (7). En general, todas las masas de agua transportan sedimento, ya sea a lo largo de la capa de fondo o en suspensión. Este fenómeno de transporte puede producir cambios morfológicos significativos en el fondo. En condiciones naturales estos cambios pueden llevar decenas de años, sin tener en cuenta el desplazamiento de las formas de fondo (dunas y rizos) que, en general, solo producen ondulaciones. En cambio, cuando se modifican esas condiciones por la construcción de alguna obra, los cambios pueden ser relativamente "rápidos" (meses o unos pocos años).

Desde el punto de vista físico el fenómeno del transporte de sedimentos es de suma complejidad. Esto ha hecho que, desde la Hidráulica, se hayan desarrollado una

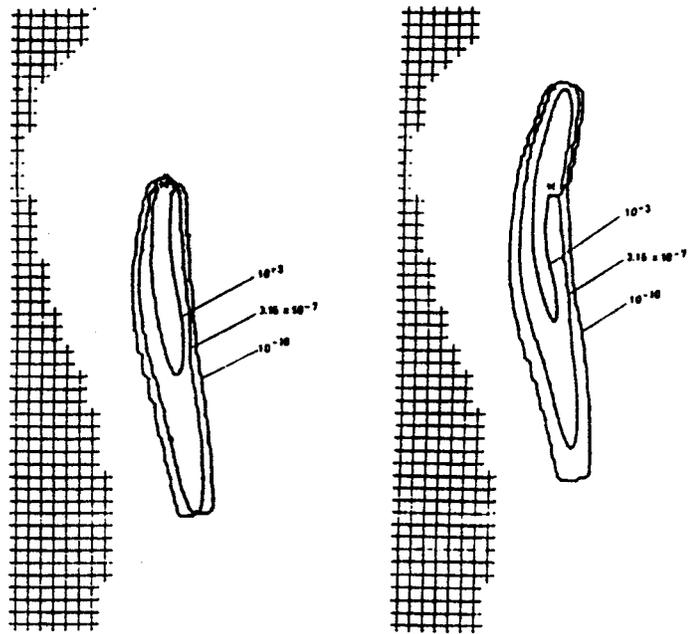


Figura 7. Penachos de contaminación (curvas de isoconcentración) para efluentes cloacales vertidos en el Río de la Plata.

gran variedad de tratamientos empíricos para producir estimaciones cuantitativas sobre los cambios morfológicos. Respecto de las teorías existe más de una escuela, cada cual aportando sus propios logros. No obstante, en la presente década se ha avanzado significativamente en la comprensión de algunos fenómenos y en la formulación de modelos que permiten efectuar simulaciones numéricas.

En donde existe más base teórica es en la descripción del transporte de sedimento en suspensión. En condiciones de equilibrio local (la tasa de deposición es igual a la de erosión) suelen utilizarse descripciones unidimensionales o bidimensionales en planta (es decir, integradas en la vertical). En cambio, en problemas donde se producen fuertes disequilibrios (por ejemplo, en las inmediaciones de una canal de navegación dragado) es necesario calcular la evolución de la distribución vertical de concentración de sedimento. Siguiendo el plano de la línea de corriente, la ecuación de transporte es (31)

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (uc) + \frac{\partial}{\partial z} [(w - w_s)c] = \frac{\partial}{\partial z} \left( \epsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (9)$$

donde  $x$  es la coordenada horizontal,  $z$  la vertical,  $c$  la concentración,  $u$  y  $w$  las componentes de la velocidad,  $w_s$  la velocidad de caída del sedimento y  $\epsilon_s$  la difusividad. Los perfiles de velocidad y de coeficiente de mezcla, que a los fines del presente problema se suponen datos, pueden ser generados a través de formulaciones semi-empíricas o calculados mediante modelos hidrodinámicos que incluyen formulaciones para las tensiones turbulentas (tales como el  $K-\epsilon$ ).

La Ec. (9) es lineal y de tipo parabólico. Aunque la coordenada  $x$  es de marcha, el dominio no es cilíndrico en esta dirección (precisamente por la presencia del canal), por lo cual se hace necesario utilizar una técnica de elementos finitos. Usando elementos cuadrangulares y un método de Petrov-Galerkin (que introduce "upwinding"), se generan sistemas algebraicos lineales de tipo tridiagonal que pueden resolverse eficientemente por técnicas de eliminación.

Una vez conocidos los perfiles de concentración, la evolución del fondo puede calcularse por medio de (31)

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} + \frac{1}{\rho_s (1-p)} \frac{\partial}{\partial x} (q_{ss} + q_{sf}) = 0 \quad (10)$$

donde  $t$  es el tiempo,  $z_0$  la cota del fondo,  $\rho_s$  la densidad del sedimento,  $p$  su porosidad,  $q_{ss}$  el transporte sólido suspendido y  $q_{sf}$  el transporte sólido de fondo. El transporte sólido suspendido se calcula integrando el producto de la velocidad y la concentración local obtenida resolviendo la Ec. (9), mientras que para el de fondo se puede adoptar una fórmula semi-empírica si se supone un equilibrio local.

La Ec. (10) es una ecuación en derivadas ordinarias que puede ser resuelta por medio de un método de Runge-Kutta. No obstante, hay que tener en cuenta que las Ecs. (9) y (10) no están estrictamente desacopladas. La variación del fondo produce cambios en las condiciones hidrodinámicas, las que, a su vez, modifican los perfiles de concentración, lo cual da lugar a variaciones en la tasa de modificación del nivel del fondo. Se utiliza, entonces, una técnica iterativa, en la cual ambas ecuaciones se van resolviendo en forma sucesiva.

En el LHA se está desarrollando el sistema AGRADA, que trata el problema del seguimiento de perfiles verticales de concentración de sedimentos fuera del equilibrio (Fig. 8), y que será aplicado para estudiar la tasa de sedimentación del canal de acceso al puerto de Bahía Blanca, que actualmente está siendo realineado.

La investigación en esta área está muy activa en lo que hace a la formulación de teorías abarcadoras y, al mismo tiempo, proveedoras de técnicas más confiables de cálculo.

#### PERSPECTIVAS

Desde el punto de vista de los requerimientos de la comunidad, la Hidráulica Computacional tiene una importancia creciente en las tareas de diseño de obras hidráulicas y en la administración en tiempo real de recursos hídricos. Ya al presente, en nuestro país la mayoría de los estudios para diseño, ya sea en la etapa de prefactibilidad, factibilidad y, con más razón, en la de ingeniería de detalle, involucran alguna instancia de modelación matemática. Aunque con modelos relativamente poco elaborados (más ligados a la Hidrología que a la Hidráulica), también existen sistemas de alerta hidrológico (crecidas) operando en algunas cuencas: Río Paraná (a través del Centro de Investigaciones Hidrológicas Ezeiza -- CIHE-- del INCYTH), Río Mendoza (a través del Centro Regional Andino -- CRA -- del INCYTH) y Río Tercero (a través del Centro de Investigaciones Hídricas de la Región Semiárida -- CIHRSA -- del INCYTH). Actualmente, se trabaja en la implementación de un sistema de pronóstico de calados para la navegación en el Río Paraná (en conjunto entre el LHA y el CIHE del INCYTH). Dado que, de acuerdo al pronóstico de algunos

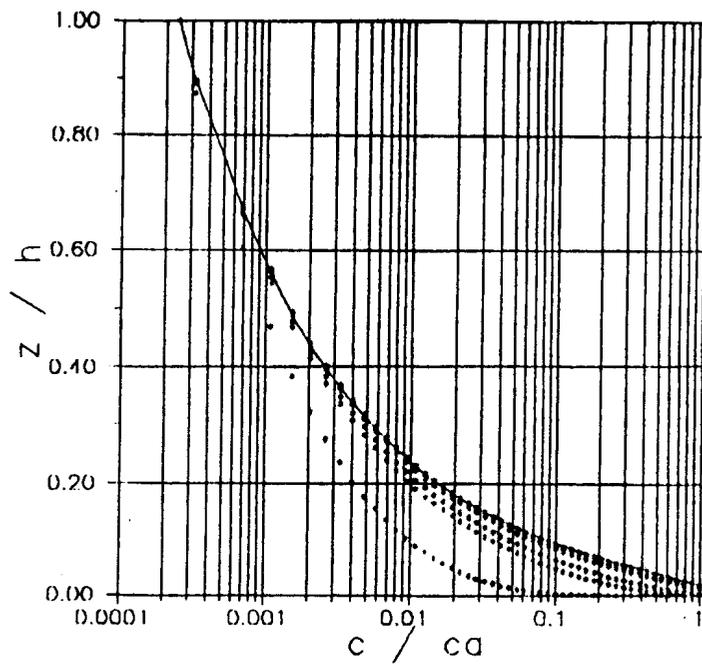


Figura 8. Adaptación de la distribución de concentraciones de sedimento (\*) al perfil de equilibrio (—).

especialistas, se anticipa que el siglo XXI puede ser el de la escasez de agua, se prevé un crecimiento sostenido de los sistemas integrados para la administración de los recursos hídricos.

Desde el punto de vista técnico, los avances que se avizoran en el mediano plazo son los siguientes:

- (i) Un reemplazo de las formulaciones puramente empíricas por las semi-empíricas. En particular, la incorporación de modelos de turbulencia o de parametrizaciones más elaboradas de sus efectos.
- (ii) La incorporación de los nuevos conocimientos que vaya proveyendo la Mecánica de los Fluidos. Esto permitirá encarar la simulación numérica de nuevos problemas o perfeccionar la de los existentes (ya sea universalizando las formulaciones o haciéndolas más precisas).
- (iii) La importación de los avances en cuanto a métodos numéricos, tanto desde la Mecánica de los Fluidos Computacional (Aerodinámica) como desde la Ingeniería Estructural. No son previsibles contribuciones significativas en el área de métodos numéricos desde la Hidráulica Computacional, ya que la principal limitación a la posibilidad de simular numéricamente está en la descripción física de los problemas.

En lo que hace a la actividad del LHA del INCYTH, se avizora una profundización de la investigación sobre simulación numérica en los temas de transporte de sedimentos, ligados a problemas de navegación, protección de márgenes, etc., y de dispersión de contaminantes, asociados a la gran temática de la Contaminación Ambiental, cuyo desarrollo es previsible. Además, se está discutiendo la apertura de nuevas áreas de trabajo: simulación de navegación, hidráulica urbana y estructuras "offshore".

#### REFERENCIAS

- [1] Cunge, J.A., "Numerical hydraulics modelling - Late '80s context and cross-roads", in "Topics in Hydraulic Modelling", J.A. Cunge & P. Ackers (ed.), Proceedings of XXII Congress IAHR, Lausanne, September 1987, pp. 17-30.
- [2] Abbott, M.B., "Computational hydraulics and modelling; some social aspects", in "Topics in Hydraulic Modelling", J.A. Cunge & P. Ackers (ed.), Proceedings of XXII Congress IAHR, Lausanne, September 1987, pp. 31-35.

- [3] Lighthill, M.J., Whitham, G.B., "On Kinematic Waves I, Flood Movement in Long Rivers", Proc. Royal Soc. Lond., vol. A229, May 1955, pp. 281-316.
- [4] Stoker, J.J., "Water Waves", Wiley-Interscience, New York, 1957.
- [5] Menéndez, A.N., Norscini, R., "Spectrum of Shallow Water Waves: An Analysis", Jr. Hydr. Div., ASCE, Vol. 108, HY1, January 1982, pp. 75-94.
- [6] Menéndez, A.N., Norscini, R., "Wave Attenuation in Open Channel Flow", Encyclopedia of Fluid Mechanics, N.P. Chermisinoff, editor, Gulf Publishing Co., vol. 2, 1986.
- [7] Henderson, F.M., "Open Channel Flow", Macmillan Publishing Co., New York, 1966.
- [8] Pujol, A., Menéndez, A.N., "Análisis unidimensional de escurrimiento en canales", EUDEBA, Buenos Aires, 1987.
- [9] Cunge, J.A., Holly, F.M.Jr., Verwey, A., "Practical Aspects of Computational River Hydraulics", Pitman, 1980.
- [10] Abbott, M.B., "Computational Hydraulics", Pitman, 1979.
- [11] Menéndez, A.N., "EZEIZA IV: Un sistema computacional para el cálculo de la traslación de ondas en ríos y canales", Informe LHA-INCYTH 067-001-87, setiembre de 1987.
- [12] Terzidis, G., Strelkoff, T., "Computation of Open Channels Surges and Shocks", Jr. Hydr. Div., ASCE, HY12, December 1970.
- [13] Carreras, P.E., Menéndez, A.N., "Un método numérico para simular ondas de inundación con frentes abruptos en escurrimientos con cambio de régimen", Informe LHA-INCYTH S5-034-87, enero de 1987.
- [14] Pujol, A., Dolinkue, A.M., "Modelo hidrodinámico EZEIZA III para la simulación de traslación de crecidas en ríos", Informe LHA-INCYTH 014-001-74, setiembre de 1974.
- [15] Pujol, A., Dolinkue, A.M., Viso, L., "Modelo matemático de red de canales", Informe LHA-INCYTH 023-002-77, marzo de 1977.

- [16] Daubert, A., Graffe, M.O., "Quelques aspects des écoulements presque horizontaux a deux dimensions en plan et non permanents application aux estuaires", La Houille Blanche, 8, 1967.
- [17] Leendertse, J.J., "Aspects of a Computational Model for Long-Period Water-Wave Propagation", Rand Memorandum RM-5294-PR, 1967.
- [18] Menéndez, A.N., "Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre", Informe LHA-INCYTH S5-016-85, diciembre de 1985.
- [19] Verboom, G.K., "Weakly-reflective boundary conditions for the shallow water equations", Publication No. 266, Delft Hydraulics Laboratory, May 1982.
- [20] Rodi, W., "Turbulence models and their application in hydraulics", State-of-the-art paper, IAHR, February 1984.
- [21] Basombrío, F., "Modelo de campos de velocidad", Informe LHA-INCYTH S5-008-74, diciembre de 1974.
- [22] Ippen, A.T., "Estuary and coastline hydrodynamics", McGraw-Hill, 1966.
- [23] Berkhoff, J.C.W., "Mathematical models for simple harmonic linear water waves. Wave diffraction and refraction", Publication No. 163, Delft Hydraulics Laboratory, 1976.
- [24] Behrendt, L., "A finite element model for water wave diffraction, including boundary absorption and bottom friction", Publication No. 37, Technical University of Denmark, 1985.
- [25] Vionnet, C., Menéndez, A.N., "Difracción-refracción combinadas para ondas en agua, utilizando elementos finitos híbridos e incluyendo contornos absorbentes y amortiguamiento por fricción", 5o. ENIEF, Bariloche, julio de 1987.
- [26] Radder, A.C., "On the parabolic equation method for water-wave propagation", Jr. Fluid Mech., 95, 1979, pp. 159-176.
- [27] Lozano, C.J., Liu, P.L.-F., "Refraction-diffraction model for linear surface water waves", Jr. Fluid Mech., 101, 1980, pp. 705-720.
- [28] Fischer, H.B., "Longitudinal dispersion and turbulent mixing in open-channel flow", Annual Review of Fluid Mechanics, 1973.

- [29] Holly, F.M.Jr., Usseglio-Polatera, J.-M., "Dispersion simulation in two-dimensional tidal flow", Jr. Hydr. Eng., ASCE, vol. 110, 7, July 1984.
- [30] Menéndez, A.N., "Simulación numérica de la dispersión de contaminantes en regiones localizadas", Informe LHA-INCYTH 066-001-86, diciembre de 1986.
- [31] van Rijn, L.C., "Sedimentation of dredged channels by currents and waves", Jr. Wat., Port, Coast. and Ocean Eng., vol 112, 5, September 1986, pp. 541-559.