

SIMULACION NUMERICA DEL IMPACTO HIDRODINAMICO DE OBRAS VIALES QUE ATRAVIESAN VALLES DE INUNDACION

Angel N. Menéndez
INA - Laboratorio de Hidráulica
Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto Ezeiza, Argentina
e-mail: menendez@satlink.com

RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis comparativo de las características, ventajas y desventajas de los modelos hidrodinámicos uni y bidimensional para representar el escurrimiento en una planicie de inundación atravesada por una conexión vial. Se ilustra la aplicación de ambas metodologías a través de tres estudios de casos. Se concluye que, si bien ambas metodologías pueden ser utilizadas si se tienen en cuenta ciertas precauciones, lo más recomendable es el uso de ambas en combinación a través de un planteo anidado o uno integrado.

ABSTRACT

In this paper, a comparative analysis of the characteristics, advantages and disadvantages of one and two dimensional hydrodynamic models to represent the flow over a flood plain traversed by a connecting road, is presented. The application of both methodologies is illustrated through a series of case studies. It is concluded that, even though both methodologies can be used if certain precautions are taken, it is most recommendable to use both of them in combination through a nesting or an integrated approach.

INTRODUCCION

La construcción de obras viales atravesando valles de inundación de ríos está siendo actualmente cuestionada desde el punto de vista ambiental debido a que constituye una obstrucción al libre desplazamiento de las aguas durante las crecidas. Sin embargo, en países en vías de desarrollo la construcción de este tipo de conexiones es todavía inexorable, ante la necesidad de completar redes de comunicación que den sustentabilidad a ese desarrollo. En consecuencia, es necesario disponer de técnicas de estudio lo suficientemente elaboradas como para poder tomar decisiones acerca de la transparencia mínima necesaria para evitar impactos inadmisibles aguas arriba de la obra y, aún más, acerca de cómo distribuir esa transparencia para garantizar el mínimo impacto aguas abajo.

Las técnicas de estudio utilizadas se apoyan en la simulación numérica del escurrimiento para escenarios críticos de crecida. Los modelos hidrodinámicos usados son del tipo unidimensional en redes [1] o del tipo bidimensional horizontal [2]. La elección de una u otra esquematización depende de varios factores, incluyendo aspectos operativos tales como disponibilidad de software y de personal entrenado para su uso. Desde el punto de vista técnico, los primeros presentan ventajas en cuanto a simplicidad de implementación, robustez y representación más adecuada del flujo en el cauce principal. Por su parte, los modelos bidimensionales son ventajosos en relación a una representación más adecuada del flujo en la planicie de inundación y a la discriminación automática de corredores de flujo.

En el presente trabajo se identifican los principales aspectos técnicos a tener en cuenta cuando se debe elegir entre un modelo hidrodinámico unidimensional o uno bidimensional para representar el flujo en valles fluviales atravesados por conexiones viales. Previamente, se introducen brevemente ambos modelos. A posteriori, y a título ilustrativo, se describen aplicaciones efectuadas por el autor donde se utilizaron ambas metodologías.

MODELOS UNI Y BIDIMENSIONAL

El modelo unidimensional de flujo se basa en la idea conceptual de que, para escalas de estudio largas en comparación con las dimensiones transversales del curso de agua, es posible efectuar un análisis integrado tratándolo como un tubo de corriente. La integración sobre la sección transversal de las ecuaciones de movimiento conduce a las Ecuaciones de Saint Venant [3,4]:

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

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + g I_f = -\frac{q}{\Omega} (U - u_L) \quad (2)$$

donde

t : coordenada temporal

x : coordenada espacial longitudinal

Ω : area de la sección transversal

Q : caudal

q : aporte lateral por unidad de longitud

$U = Q/\Omega$: velocidad media de flujo

g : aceleración de la gravedad

$z = z_o + h$: cota de la superficie libre

z_o : cota del fondo

h : tirante

I_f : pendiente de fricción

u_L : componente en la dirección x de la velocidad del aporte lateral.

La red conformada por varios cursos de agua que se bifurcan, convergen o entrelazan se trata especificando adecuadas condiciones de empalme en los puntos de ramificación.

La resolución numérica del sistema (1)-(2) y su implementación en un código computacional han sido presentadas en un trabajo previo [5].

La utilización del modelo unidimensional para representar el escurrimiento sobre una planicie de inundación, segmentándolo en varios corredores de flujo, es una esquematización adicional cuyo alcance tiene mayores limitaciones que la formulación original, ya que esa segmentación, que debe imponerse como dato, no surge naturalmente.

Por su parte, el modelo bidimensional (horizontal) de flujo está basado en el hecho de que, para escalas de estudio del orden de las dimensiones laterales (ancho) del escurrimiento pero largas respecto de las dimensiones verticales (profundidad), el flujo puede tratarse como una lámina. Las ecuaciones de movimiento se integran entonces sobre toda la profundidad de flujo, resultando las Ecuaciones para Aguas Poco Profundas [6]:

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_g v + g \frac{\partial(h+z_0)}{\partial x} + \frac{\tau_{fx}}{\rho h} - \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f_g u + g \frac{\partial(h+z_0)}{\partial y} + \frac{\tau_{fy}}{\rho h} - \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) = 0 \quad (5)$$

donde

u : velocidad media vertical según x

v : velocidad media vertical según y

$f_g = 2\omega \sin \phi$: factor geotrófico

ω : velocidad angular de rotación de la Tierra

ϕ : latitud

τ_{xx}, τ_{yy} : componentes de la tensión de corte contra la superficie debido al viento

τ_{fx}, τ_{fy} : componentes de la tensión de corte contra el fondo

T_{ij} : tensor de las tensiones efectivas

La resolución numérica del sistema (3)-(5) y su implementación en un código computacional también han sido presentadas en un trabajo previo [7].

La utilización del modelo bidimensional para representar el escurrimiento sobre una planicie de inundación resulta natural, aunque presenta el inconveniente de que debe dar cuenta de dos escalas laterales generalmente disímiles: el relativamente pequeño ancho del cauce principal del río, por donde se conduce la mayor parte del flujo, y el ancho de la planicie.

ANÁLISIS COMPARATIVO

A continuación se describen las principales características, ventajas y desventajas de cada una de las dos formas de modelación para representar el escurrimiento sobre una planicie de inundación atravesada por una conexión vial.

Modelación unidimensional

- **Aceptabilidad:** Su utilización es aceptable en la medida en que los corredores de flujo a lo largo de la planicie de inundación (que se convierten en ramas del modelo) puedan ser dibujados a priori, preferentemente en base a observaciones de campo.
- **Artificio de la esquematización:** Debe incluir algunos cortos corredores de flujo transversales artificiales (ramas transversales del modelo) entre corredores longitudinales adyacentes (ramas longitudinales) a diferentes distancias para permitir intercambio de fluido entre ellos, supuestamente pequeño en magnitud para el escenario de calibración, aunque podría convertirse en significativo para otras condiciones de flujo.
- **Representación de la conexión:** Considera a los terraplenes y aperturas de la conexión física como singularidades donde ocurren pérdidas de energía asociadas a la contracción y posterior expansión del flujo.

- **Adaptabilidad:** Se adapta especialmente a la escala regional, es decir, a dominios de flujo mucho más largos que el ancho de la planicie de inundación.
- **Régimen de flujo:** Puede ser operado sin dificultad en régimen completamente impermanente.

Modelación bidimensional

- **Ventaja:** Tiene la ventaja de evitar la imposición a priori de cualquier limitación sobre la distribución del flujo a través de la planicie de inundación.
- **Artificio de la esquematización:** Debe representar el curso principal de acuerdo al criterio del cauce equivalente [8], que consiste en utilizar solo unos pocos nodos para cubrir su ancho, pero ajustando su profundidad y/o su rugosidad para que conduzca el caudal requerido para el dado nivel de agua.
- **Representación de la conexión:** Cuando la escala de resolución es relativamente pobre, considera a los terraplenes como obstáculos unidimensionales opacos y sus aberturas como conjuntos sumidero-fuente (aguas arriba y abajo, respectivamente, de la conexión), con la ley de descarga de la estructura que produce la contracción. En cambio, si la escala de resolución es alta representa completamente el flujo a través de la contracción, de modo que no es necesario ningún tratamiento especial.
- **Adaptabilidad:** Se adapta mejor a la escala local, es decir, a dominios de flujo con longitudes del orden del ancho de la planicie de inundación.
- **Régimen de flujo:** Puede ser corrido generalmente como en régimen permanente sólo para el caudal pico, teniendo en cuenta el carácter cuasi-cinemático de las ondas de inundación (flujo cuasi-estacionario) y la relativamente corta extensión del dominio (escala local).

Modelación uni y bidimensional

- **Combinación:** El procedimiento óptimo es, quizás, la utilización de ambos tipos de modelación en combinación: ya sea el “tratamiento anidado”, que consiste en un modelo unidimensional regional que provee las condiciones de borde para un modelo bidimensional local, o el “tratamiento integrado”, en el cual ambas técnicas se ligan dinámicamente, permitiendo modelar algunas áreas bidimensionalmente y otras unidimensionalmente.

APLICACIONES

El autor ha utilizado modelación hidrodinámica uni y bidimensional en el Delta del río Paraná. El río Paraná es uno de los más caudalosos del mundo, con un caudal medio anual de 18.000 m³/s y picos que pueden elevarse por sobre 50.000 m³/s durante las crecidas extraordinarias, cuya frecuencia ha aumentado durante las últimas dos décadas. El Delta del río Paraná es una enorme planicie de inundación de alrededor de 400 km de longitud y un ancho máximo, en la desembocadura, de alrededor de 100 km.

Ruta Nacional N° 12

La obra vial principal a través del Delta del Paraná es la Ruta Nacional N° 12, a lo largo de la cual transita la mayor parte de las mercaderías involucradas en el comercio del Mercosur. Esta conexión resultó severamente dañada durante la crecida extraordinaria de 1983: tres puentes colapsaron, dejando físicamente aislada a la Mesopotamia argentina. Esta situación disparó el primer estudio de

modelación, destinado a establecer la influencia de la conexión (y, adicionalmente, de cada obra de infraestructura presente en la planicie) sobre el flujo. Se implementó, calibró y explotó un modelo bidimensional del Delta completo [9], obteniéndose respuestas cuantitativas para un análisis a posteriori de los efectos de la conexión (Figura 1).

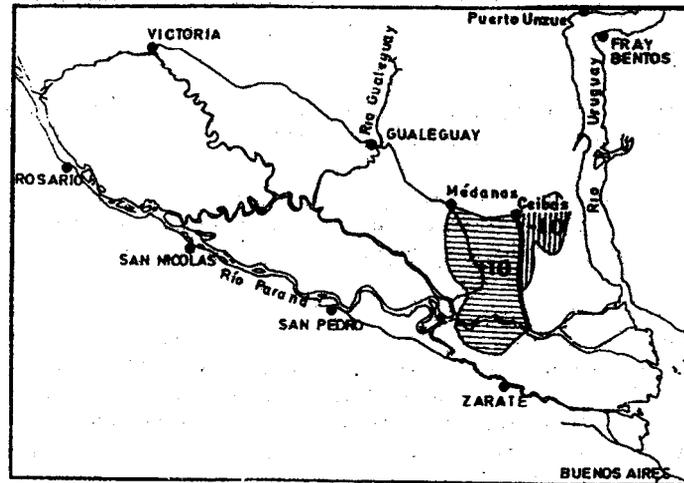


Figura 1 Zonas con diferencias de nivel de agua por sobre 0,10 m debido al efecto de la Ruta 12, de acuerdo a un modelo bidimensional.

La elección de un modelo bidimensional se basó en apreciar que, debido a la enorme extensión de la onda, la inundación ocupó simultáneamente todo el valle. Además, precisamente debido a esa gran duración, pudo considerarse un régimen cuasi-estacionario, de modo que sólo fue preciso representar la condición de caudal pico.

Red de caminos interisleños

A principios de los años 90 se proyectó una red de caminos para establecer una comunicación interisleña más rápida que la vía fluvial en la zona del delta bonaerense. Esta vez se usó un modelo unidimensional de redes para obtener los parámetros de diseño relacionados al porcentaje de transparencia de cada camino, de modo de minimizar sus efectos sobre el flujo durante las crecidas [10] (Figura 2). El criterio de impacto mínimo consistió en imponer un límite superior al incremento de altura de agua causado aguas arriba por cada camino. Al momento, sólo unos pocos de estos caminos han sido construidos.

La utilización de un modelo unidimensional se justificó en el hecho de que el control del flujo lo ejercen los brazos más importantes de la red (Paraná de las Palmas, Paraná Guazú, Paraná Bravo, Paraná Ibicuy, Paraná Miní, etc.), determinando entonces las condiciones de borde para el flujo sobre las islas, que fueron tratadas individualmente.

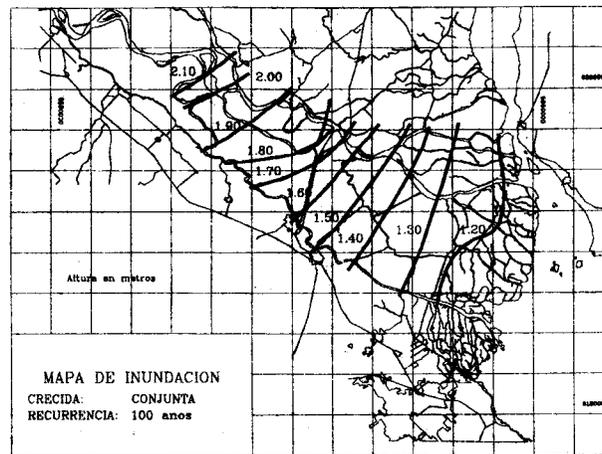


Figura 2 Líneas de nivel de la superficie libre para una inundación combinada de los ríos Paraná y Río de la Plata de 100 años de recurrencia, de acuerdo a un modelo unidimensional.

Puente Rosario-Victoria

Actualmente está finalizando la construcción de una nueva obra vial, que une las ciudades de Rosario y Victoria. En este caso se utilizó una combinación de un modelo regional unidimensional, que se extendió desde la ciudad de Diamante hasta el Río de la Plata, y un modelo local bidimensional, de cuya explotación surgieron las localizaciones y luces de cada puente [11]. El criterio de impacto fue mejorado fuertemente, incorporando la ausencia de desplazamiento de los corredores de flujo (Figura 3).

El uso de la variante anidada de la metodología combinada resultó importante para definir condiciones de borde del bidimensional para los distintos escenarios de análisis.

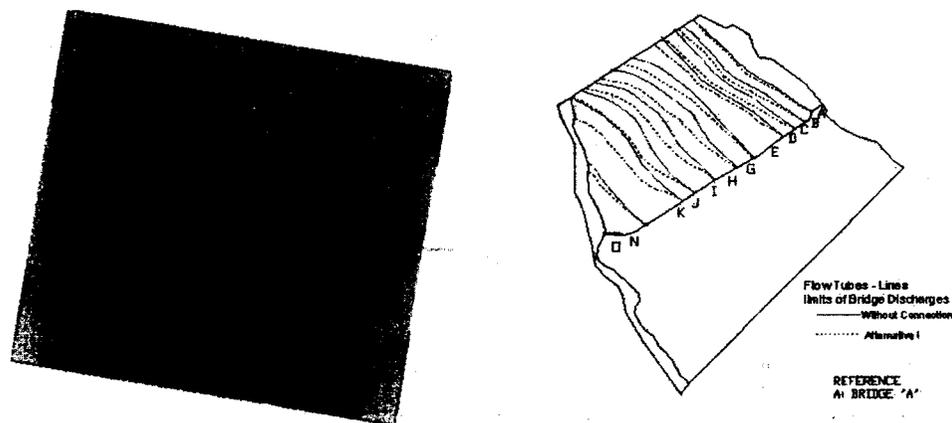


Figura 3 Corredores de flujo aguas arriba de la conexión Rosario-Victoria para la situación con y sin la conexión, de acuerdo a un modelo bidimensional.

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista técnico, la elección de un modelo unidimensional o uno bidimensional para simular el escurrimiento en una planicie de inundación atravesada por una conexión vial depende no sólo de las características particulares del problema sino también de la información disponible. Los modelos unidimensionales pueden resultar adecuados si se dispone de buena información de campo sobre cómo se distribuye el flujo sobre la planicie. Los modelos bidimensionales no tienen esta restricción, aunque tienen limitaciones para representar el flujo concentrado en el cauce principal. La combinación de ambos, a través de un planteo anidado (modelo 1D sobre escala regional y 2D sobre escala local) o uno integrado (modelación 2D en la planicie y 1D en el cauce principal), es la metodología recomendable.

REFERENCIAS

- [1] Menéndez, A.N., *Ezeiza V: un programa computacional para redes de canales*, V Congreso Argentino de Mecánica Computacional, MECOM'96, San Miguel de Tucumán, setiembre 1996.
- [2] Menéndez, A. N., *Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos*, Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, vol. 6, 1, 1990.
- [3] Henderson, F.M., *Open Channel Hydraulics*, Macmillan Publ. Co., 1966.
- [4] Pujol, A., Menéndez, A. N., *Análisis unidimensional de escurrimiento en canales*, EUDEBA, 1987.
- [5] Menéndez, A.N., *Ezeiza V: un programa computacional para redes de canales*, V Congreso Argentino de Mecánica Computacional, MECOM'96, San Miguel de Tucumán, setiembre de 1996.
- [6] 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, N° 8, 1967.
- [7] Menéndez, A. N., *Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos*, Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, vol. 6, 1, 1990.
- [8] Menéndez, A.N., *2D Modelling with Strong Bathymetric Changes*, XXIV Congress of IAHR, Madrid, España, setiembre de 1991.
- [9] Menéndez, A.N., Cavaliere, M.A., Marazzi, M.L., *Assessing the Impact of Structures on Extraordinary Flood Levels: a Methodology and a Case Study*, XXV IAHR Congress, Tokyo, Japan, August-September 1993.
- [10] Menéndez, A.N., Bronstein, P., *The Parana Delta: a Mixed Ecological-Structural Solution for Flood Plain Management*, 1st. International Conference on New/Emerging Concepts for Rivers, Rivertech'96, Chicago, USA, September 1996.
- [11] Cardini, J., Menéndez, A.N., Garea, M., Legal, N., *Minimization of the Hydraulic Impact of a Physical Connection through a River Flood Plain*, New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life: Eco-compatible Solutions for Aquatic Environment, Capri, Italy, July 2000.