

**LA SIMULACION NUMERICA  
EN ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL**

**Angel N. Menéndez**  
INCYTH-Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente Humano  
C.C. 21, 1802 Aerop. Ezeiza, Argentina

**RESUMEN**

Se describe la inserción de estudios basados en simulación numérica dentro del marco de la determinación del impacto ambiental de obras de ingeniería. Se presentan varios ejemplos dentro de la temática hídrica, para cada uno de los cuales se precisan los objetivos del estudio, los modelos de simulación utilizados, el alcance de los resultados y las conclusiones obtenidas.

**ABSTRACT**

The insertion of studies based on numerical simulation, within the framework of the determination of the environmental impact of engineering works, is described. Several examples, within the subject of water resources, are presented. For each one of them the objectives of the study, the simulation models used, the scope of the results and the obtained conclusions are explained.

**INTRODUCCION**

El desarrollo de la civilización, que ha traído aparejado un crecimiento descontrolado de la población y un amplio despliegue de obras de infraestructura, ha producido un impacto considerable sobre el medio ambiente. Ante la magnitud de este impacto, han tomado relevancia los estudios destinados a identificarlo cualitativa y cuantitativamente.

En la actualidad, los proyectos de obras de relativa magnitud deben estar acompañados por estudios de impacto ambiental que demuestren que éste permanece controlado, eventualmente incluyendo medidas mitigadoras. Por otro lado, se encarán estudios de impacto de obras ya existentes que producen una clara perturbación ambiental, con el objetivo de definir medidas correctivas.

Los estudios de impacto ambiental parten de una base descriptiva de los posibles efectos de un emprendimiento. El pasar a una fase cuantitativa no es sencillo, ya que mientras resulta relativamente accesible calcular el impacto mecánico sobre el medio, es más esquivada la posibilidad de cuantificar los efectos sobre la biota y sobre la población del entorno. Pero es sólo a partir de una base común de cuantificación cuando puede tener lugar el análisis sistémico para tratar de alcanzar una situación óptima.

En cualquier caso, lo que se necesita es recurrir a un modelo de funcionamiento de cada parte del sistema. Y es aquí donde la simulación numérica se convierte en una de las herramientas básicas de los estudios de impacto ambiental.

En particular, una gran cantidad de emprendimientos se encuentran vinculados a los recursos hídricos. La siguiente es una lista de algunos de los problemas más frecuentes

relacionados con esos recursos y los impactos mecánicos asociados:

- \* *Descarga de residuos domésticos, industriales y agrícolas:* contaminación orgánica e inorgánica.
- \* *Descarga de aguas de enfriamiento:* contaminación térmica.
- \* *Emplazamiento de obras de control sobre cursos fluviales:* variación del régimen fluvial, sedimentación y eutroficación de reservorios artificiales, erosión de márgenes por la operación de la obra.
- \* *Emplazamiento de vías de comunicación en los valles de inundación:* sobrelevación de niveles de agua durante las crecidas.
- \* *Dragado:* efecto contaminante del material removido, impacto hidráulico de zonas de refulado.
- \* *Emplazamiento de obras de abrigo en costas marítimas:* erosión de playas.

La enumeración de estos problemas ilustra la diversidad de fenómenos que es necesario simular, lo que requiere la implementación computacional de variados modelos matemáticos.

El INCYTH ha venido trabajando en todas las áreas mencionadas, lo que ha involucrado el desarrollo de programas computacionales y la prestación de servicios de consultoría en base a ellos. La siguiente es una lista de algunos de los principales estudios de consultoría relacionados con la temática ambiental:

- \* *Impacto hidráulico:*
  - Obras costeras en la ciudad de Buenos Aires
  - Puente Buenos Aires-Colonia
- \* *Erosión:*
  - Cauce del río Paraná por emplazamiento de la presa de Paraná Medio
  - Márgenes del río Uruguay por la operación de la central de Salto Grande
- \* *Contaminación por descargas de efluentes domésticos:*
  - Río de la Plata
  - Bahía Blanca

Se utilizaron los siguientes modelos, desarrollados en el INCYTH:

- \* Modelo bidimensional de corrientes
- \* Modelo unidimensional de red de canales
- \* Modelo unidimensional de sedimentación/erosión
- \* Modelo de operación de una central hidroeléctrica
- \* Modelo bidimensional de dilución de contaminantes
- \* Modelos bidimensionales de transformación de oleaje

Con el objetivo de ilustrar el marco que la temática ambiental impone a los estudios de simulación numérica, en el presente trabajo se describen los principales lineamientos de algunos de los estudios mencionados, incluyendo:

- a) Objetivos
- b) Definición del modelo/modelos de simulación
- c) Alcance de los resultados obtenidos
- d) Conclusiones del estudio

## IMPACTO HIDRAULICO

La implementación de obras de ingeniería que interfieren con un curso de agua producen un impacto sobre el régimen hidráulico, que se manifiesta primariamente como variaciones de las magnitudes hidrodinámicas, a saber, nivel de agua y velocidades de flujo. Estas perturbaciones se transmiten luego a variables más evidentes: patrón de erosión/sedimentación del lecho, tasa de sedimentación de canales de navegación, erosión costera, maniobra de embarcaciones, trayectoria de cardúmenes, etc. En consecuencia es necesario cuantificarlas, de modo de poder establecer y, eventualmente, minimizar su incidencia.

### Obras costeras en la ciudad de Buenos Aires

La modificación de la línea costera de la ciudad de Buenos Aires, a través de rellenos y obras de ingeniería (espigones, escolleras) ha sido una actividad continua durante el presente siglo. Dado que los usos primarios del Río de la Plata son, hasta el presente, los de navegación comercial y deportiva y provisión de agua potable, cualquier obra de relleno actual requiere, para su aprobación, demostrar que su implementación no afecta significativamente aquellos usos.

Este tipo de estudios se han llevado a cabo utilizando el modelo matemático hidrodinámico HIDROBID II [1], basado en las ecuaciones para aguas poco profundas (integradas en vertical), resueltas por diferencias finitas mediante un método implícito de direcciones alternadas. La metodología de análisis consiste en efectuar ensayos numéricos con y sin la obra, de modo de determinar las variaciones que origina su presencia.

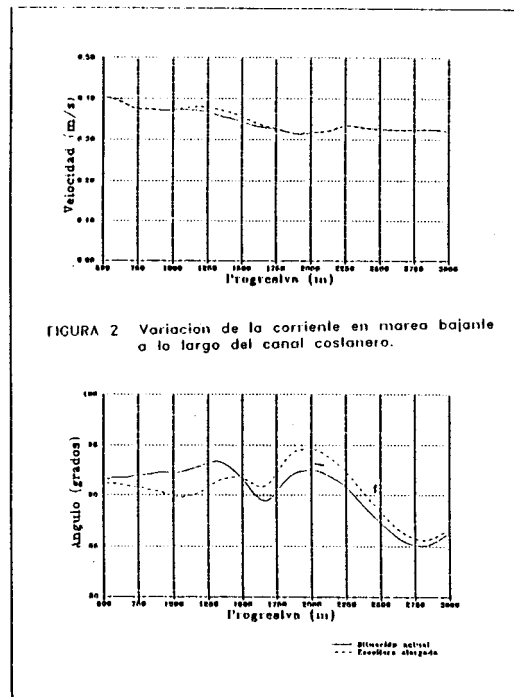
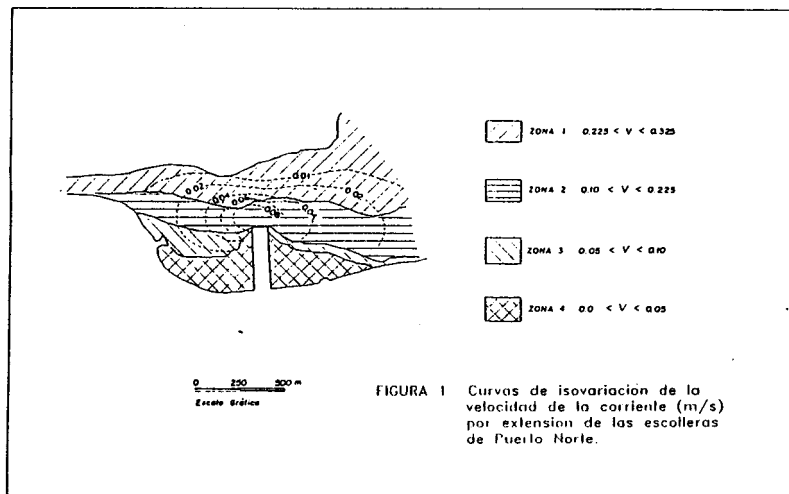
A título ilustrativo, en la Figura 1 se muestran curvas de isovariación de la velocidad de la corriente del Río de la Plata para el caso de prolongarse en 100 m las escolleras de Puerto Norte [2]. Las dimensiones longitudinal y transversal del dominio de cálculo fueron de 4000 y 2300 m, respectivamente. El paso de discretización utilizado para el modelo fue de 40 m, lo que da una malla de 100 x 58 nodos de cálculo. En la Figura 2 se presenta la distribución de intensidad y dirección de la corriente, con y sin obra, sobre un corte a lo largo del Canal Costanero (canal de navegación de bajo calado), que es el parámetro determinante de la tasa de sedimentación. La modificación de esta tasa fue calculada apelando a fórmulas semiempíricas.

Los resultados del modelo hidrodinámico se consideran de una precisión suficiente a los fines ingenieriles, es decir, no constituyen una fuente de error mensurable.

La conclusión más importante del estudio fue que no deben esperarse variaciones relevantes en la tasa de sedimentación del Canal Costanero.

### Puente Buenos Aires-Colonia

Con una metodología similar a la anterior se estudió, de una forma esquematizada, el impacto que producirían las diversas trazas del puente Buenos Aires-Colonia [3]. En el caso de las trazas que atraviesan el Río de la Plata (hay una que se desarrolla sobre el frente del Delta del Paraná) se utilizó el modelo HIDROBID II para simular las condiciones producidas por uno de los módulos del viaducto, de alrededor de 40 m de ancho. Se utilizó un paso de discretización muy pequeño (0,25 m), de modo de resolver detalles del flujo generados por los pilotes de las pilas del puente, obteniéndose mallas de alrededor de 80 x 180 nodos. En la Figura 3 se muestran las líneas de corriente correspondiente a una situación particular (los bordes superior e inferior son ejes de simetría).



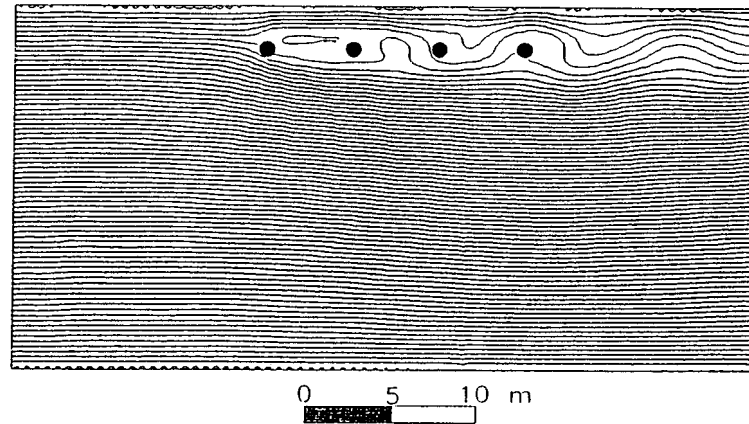


FIGURA 3 Líneas de corriente por el flujo percurvado por la presencia de pilotes.

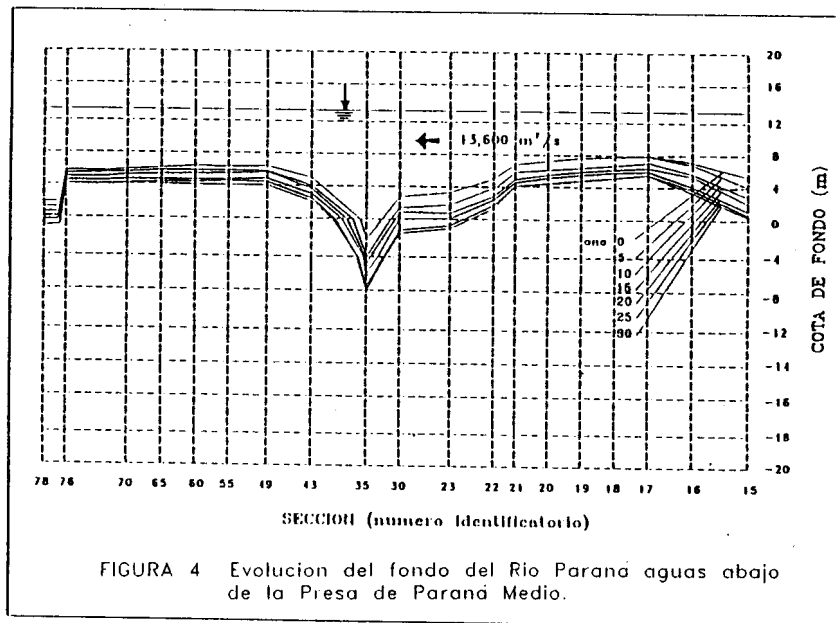


FIGURA 4 Evolucion del fondo del Río Paraná aguas abajo de la Presa de Paraná Medio.

La precisión de los resultados se considera suficiente fuera de la zona de estela (su correcta representación requeriría una discretización aún más fina y la incorporación de modelos más elaborados de turbulencia).

Una de las conclusiones básicas del estudio es que la afectación de la intensidad de la corriente del río, por la presencia de la pila del viaducto, es significativa sólo en un entorno de alrededor de 5 m de ancho hacia ambos lados.

### **EROSION**

Los cambios naturales o artificiales en el régimen hidráulico de un río producen perturbaciones en la acción de la corriente sobre su lecho y/o márgenes, que pueden manifestarse en erosiones. Es necesario, entonces, determinar la posibilidad de ese efecto y, eventualmente, cuantificarlo, de modo de conocer las consecuencias y, eventualmente, disponer de las medidas destinadas a evitarlas o mitigarlas.

#### **Cauce del río Paraná por emplazamiento de la presa de Paraná Medio**

El emplazamiento de la presa de Paraná Medio produciría un corte del transporte de sedimentos gruesos a lo largo del río Paraná. Esto significaría que, inmediatamente aguas abajo de la presa, el material de fondo removido por la corriente no sería repuesto, generando un proceso erosivo que se extendería progresivamente.

Para estudiar este fenómeno se utilizó un modelo hidrodinámico basado en las Ecuaciones de Saint Venant (transversalmente integradas), y se supuso un transporte de sedimentos en equilibrio local, utilizándose la fórmula de transporte de Engelund-Hansen [4]. Se efectuaron ensayos con el caudal formativo del río, es decir, el que transporta su carga sólida total anual. En la Figura 4 se muestran perfiles del fondo para distintos tiempos luego del cierre del río.

El alcance de este tipo de modelaciones es determinar el orden de magnitud de los resultados, por las limitaciones que imponen las deficiencias en el conocimiento físico y en la representación matemática del problema.

Como conclusión del estudio, se determinó que en alrededor de dos décadas quedaría inutilizado el Túnel Subfluvial Hernandarias, ya que se removería el espesor de tapada mínimo requerido para evitar su desarticulación por flotación.

#### **Márgenes del río Uruguay por la operación de la central de Salto Grande**

Los márgenes del río Uruguay, aguas abajo de la presa de Salto Grande, están sometidas a una fuerte acción erosiva debido a la combinación de varios factores:

- i) Corrientes por crecidas naturales del río
- ii) Corrientes por picos de descarga de la central debido a operación en hora pico
- iii) Oleaje por operación del vertedero durante el pasaje de grandes crecidas
- iv) Pérdida de estabilidad por desembalse rápido

Se efectuaron estudios para cuantificar la incidencia de cada factor en el proceso erosivo observado en varios puntos de la costa, de modo de determinar la responsabilidad que le cabe a cada uno de esos factores [5].

En particular, para el análisis del tercer factor se utilizaron los siguientes modelos:

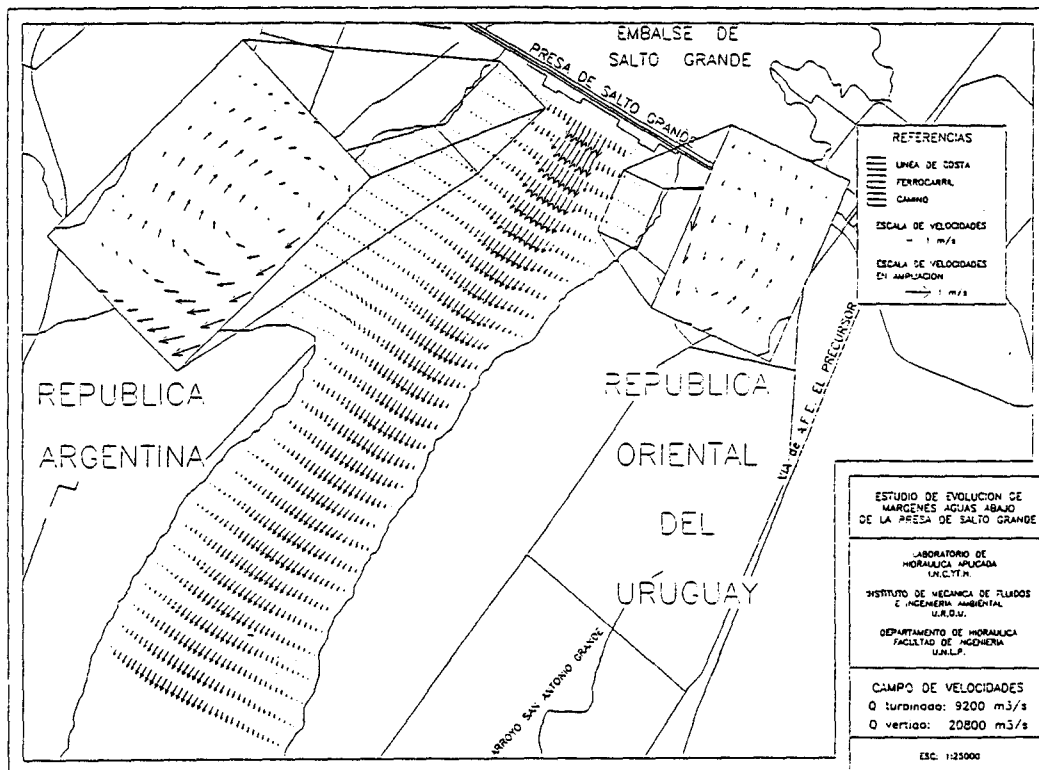


FIGURA 5 Campo de velocidades aguas abajo de la presa de Salto Grande (Río Uruguay)

a) Modelo de operación del embalse: Se basa en la ecuación de continuidad. En base al hidrograma de caudales de entrada y una política de operación, determina los niveles instantáneos en el embalse y los caudales erogados.

b) Modelo hidrodinámico: En base al modelo HIDROBID II se simularon las corrientes que se desarrollan en un tramo de 6 km aguas abajo de la presa. El ancho del dominio de cálculo fue de 2550 m. Se tomó un paso de discretización de 100 m en la dirección longitudinal y 25 m en la transversal, lo que da un total de 61 x 102 nodos. El dato de entrada es el caudal erogado por la presa (centrales y vertedero), provisto por el modelo de operación del embalse. En la Figura 5 se muestra el campo de velocidades resultante para una de las condiciones ensayadas.

c) Modelo de propagación de olas: Se utilizó el modelo parabólico SCATTER [6], que calcula la propagación de un frente de olas considerando efectos de difracción transversales. La malla de discretización se densificó cuatro veces. Los datos de entrada son las corrientes, provistas por el modelo hidrodinámico, y la altura y período de las olas generadas al pie del vertedero, determinadas en base al caudal erogado.

d) Modelo de erosión: Con las acciones de corrientes y olas calculadas por los dos modelos previos, se efectuaron determinaciones de potencial de erosión en base a fórmulas de arrastre.

Los modelos se operaron utilizando una metodología de Monte Carlo, es decir, efectuando ensayos para distintas realizaciones de la serie anual de caudales, generadas en base a una distribución estadística determinada empíricamente.

A pesar de las deficiencias del cálculo de erosión, ya apuntadas anteriormente, la confiabilidad de los resultados de la modelación es razonable en cuanto a determinar si la magnitud de la erosión observada es compatible con la acción analizada.

Como conclusión de los estudios se determinó que la acción del oleaje es un factor de menor importancia en el proceso de erosión localizada.

#### CONTAMINACION POR DESCARGAS DE EFLUENTES DOMESTICOS

Las aguas residuales urbanas son descargadas a los cursos de agua con la expectativa de que éstos la procesen a través de su capacidad de autodepuración. Si bien este mecanismo funcionó razonablemente (con notables excepciones) hasta este siglo, el desarrollo vertiginoso de la civilización, con el correlato de enormes concentraciones urbanas y nuevos y abundantes usos del agua, ha generado una situación en la que la capacidad receptora de la mayoría de los cursos de agua aparece saturada. La instalación de estaciones depuradoras, previo a su vertido, es la solución clásica. Pero existen diversos niveles de tratamiento. La elección es un problema técnico-económico. Lo que es necesario es determinar el impacto contaminante que causa el vertido, para distintos niveles de tratamiento.

#### Río de la Plata

Las aguas residuales se vierten por medio de un emisario submarino a 2,5 km de la costa, a la altura de Berazategui (Figura 6). Se descargan las aguas crudas, aunque, dentro del contrato de concesión a la empresa Aguas Argentinas, está prevista la construcción de una planta de tratamiento.



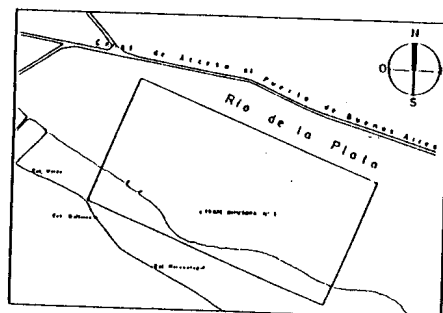


FIGURA 6 Punto de vertido y Zona de Modelación.

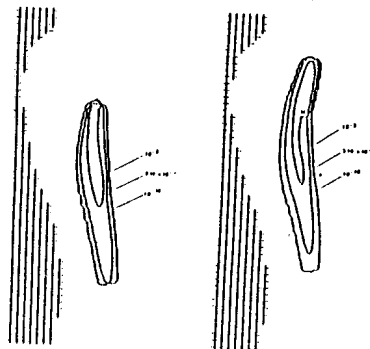


FIGURA 7 Curvas de isoconcentración de bacterias coliformes en en creciente y bajante.

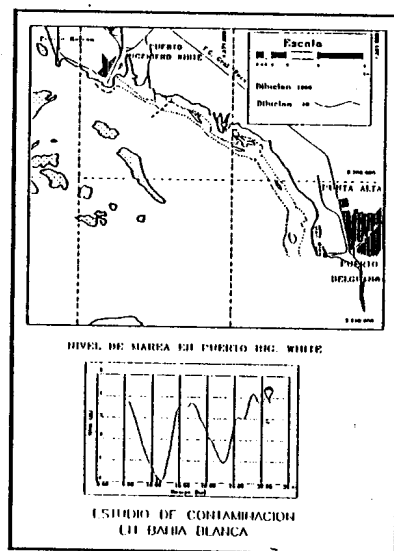


FIGURA 8 Curvas de isodilución de un contaminante conservativo para el instante indicado.

En el año 1988 se efectuaron los estudios de este impacto contaminante [7]. Se utilizó el modelo HIDROBID II para simular las corrientes de marea. Luego, la descarga contaminante se calculó con el programa MANCHAS, que resuelve la ecuación de transporte y difusión de un contaminante pasivo mediante una técnica Lagrangiana [8]. Esta consiste en efectuar el seguimiento de pequeñas manchas (que resultan gaussianas, en primera aproximación), que son transportadas por la corriente y difundidas por la turbulencia y la advección diferencial, y cuya superposición representa el penacho de contaminación. Eventualmente, se incorporan fuentes o sumideros representando reacciones químicas, bioquímicas o biológicas.

Se efectuaron ensayos para el caso de bacterias coliformes, bajo distintas condiciones hidrometeorológicas estadísticamente significativas. En la Figura 7 se presentan las curvas de isoconcentración de contaminante para dos estados de marea y condiciones hidrometeorológicas normales (vientos suaves). Esas concentraciones están referidas a la correspondiente a la salida del emisario, luego de la dilución inicial (la cual depende del tipo de difusor).

La confiabilidad de los resultados de este tipo de modelos dependen fuertemente del tipo de contaminante analizado. Para aquellos involucrados en procesos químicos, bioquímicos o biológicos relativamente bien establecidos (como en el presente problema), los resultados son suficientes para determinar zonificaciones en términos de niveles de calidad de las aguas.

La conclusión principal del estudio es que, a los fines de la toma de agua de Bernal, la calidad del agua no se ve afectada durante condiciones hidrometeorológicas normales, pero podrían esperarse dificultades durante sudestadas. El panorama es peor para la calidad de agua en la costa, con fines recreacionales, ya que la acción del viento transporta rápidamente al contaminante hasta esa zona.

#### **Bahía Blanca**

El problema estudiado es similar al anterior, ya que se trata de la descarga cloacal de la ciudad de Bahía Blanca en la ría homónima [9]. Sin embargo, la situación es más compleja por tratarse de una zona de importantes bancos de sedimentos, que se cubren y descubren intermitentemente. Esto significa una modelación más sofisticada.

Esta se llevó a cabo con los mismos programas. Esta vez al programa MANCHAS se le incluyó el seguimiento de la DBO (demanda bioquímica de oxígeno), que es una medida de la contaminación orgánica de las aguas.

La confiabilidad de los resultados aparece aminorada, respecto del caso anterior, debido a las complicaciones del flujo y la ausencia de determinaciones experimentales del coeficiente de dispersión longitudinal.

La conclusión principal de los estudios es que el impacto se desarrolla sobre una gran extensión longitudinal, pero sobre una distancia transversal relativamente pequeña en condiciones hidrometeorológicas normales (Figura 8).

#### **MARCO GENERAL DE LOS ESTUDIOS**

A partir del acuerdo sobre el concepto de desarrollo sustentable, producto más visible de la declaración de Río (1992), la factibilidad de una obra debe pasar por un estudio de impacto ambiental, en el cual se considere la interrelación entre todas las variables

significativas del medio ambiente afectado. Esto significa que los estudios particulares (como los presentados) deben insertarse en un marco más general que tenga en cuenta toda la problemática ambiental, lo cual requiere la interacción con expertos de las otras disciplinas involucradas (ecólogos, sociólogos, antropólogos, urbanistas, planificadores, economistas, abogados, etc.) de modo de desarrollar una visión sistémica que permita identificar la alternativa más adecuada para la solución del problema en cuestión.

### CONCLUSIONES

El presente trabajo ha mostrado, a través de ejemplificaciones, que los modelos de simulación numérica constituyen herramientas imprescindibles dentro de estudios de impacto ambiental, ya que son los que permiten predecir respuestas del ecosistema sobre escenarios futuros.

También ha quedado evidenciada la cantidad de especialidades que es necesario manejar, aún dentro de una misma disciplina, lo que ilustra acerca del esfuerzo de coordinación que se requiere para integrar las especialidades no incluidas en los presentes estudios.

### REFERENCIAS

- [1] 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.
- [2] Castellano, R.D., Menéndez, A.N., Cavaliere, M., *Estudio de las condiciones hidráulicas y sedimentológicas en las proximidades de Puerto Norte*, Informe LHA-INCYTH S4-36-92, 1992.
- [3] Menéndez, A.N., Bombardelli, F.A., Lapetina, M.R., *Estudio del impacto hidráulico del puente Buenos Aires-Colonia. Informe N°3*, Informe LHA-INCYTH 141-03-95, Comitente: Louis Berger International, Inc., 1995.
- [4] Hopwood, H.J., Buceta, J.S., *Túnel Subfluvial Hernandarias. Estudio sobre modelo hidráulico*, Informe LHA-INCYTH 040-004-82, 1982.
- [5] Brea, J.D., Menéndez, A.N., Yañez, M.N., Bombardelli, F.A., Montalvo, J.L., Arduino, G., De los Santos, J., Sanguinetti, J., Pintos, M., Dias, R., Bianchi, G., Cielli, P., *Estudio de evolución de márgenes aguas abajo de la presa de Salto Grande. Informe Final*, Comitente: Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, 1993.
- [6] Menéndez, A.N., Cavaliere, M.A., *Modelo de propagación de oleaje con difracción e interacción con la corriente*, 7o. Encuentro Nacional de Investigadores y Usuarios del Método de los Elementos Finitos ENIEF 90, Mar del Plata, noviembre de 1990.
- [7] Carreras, P., Menéndez, A.N., *Proyecto de tratamiento y disposición de efluentes domésticos del Gran Buenos Aires. Informe final del modelo matemático de dispersión de contaminantes*, Informe LHA-INCYTH 070-004-88, Comitente: OSN, agosto de 1988.
- [8] Carreras, P.E., Menéndez, A.N., *Mathematical simulation of pollutant dispersion*, Journal of Ecological Modelling, 52, Nov. 1990.
- [9] Bombardelli, F.A., Menéndez, A.N., Montalvo, J.L., *Cuantificación del impacto de los vertidos en la ría de Bahía Blanca*, Informe LHA-INCYTH 124-03-94, Comitente: AGOSBA, diciembre de 1994.

