

## **MODELACION HIDROSEDIMENTOLOGICA EN TOMAS DE AGUA AFECTADAS POR UN REGIMEN DE MAREA**

**Pablo A. Tarela, Angel N. Menéndez,  
Fabián A. Bombardelli, Carla P.X. Vilela**  
Instituto Nacional del Agua y del Ambiente - INA (ex INCyTH)  
CC 21 (1802) Aeropuerto de Ezeiza - Buenos Aires, Argentina

### **RESUMEN**

En este trabajo se presenta una metodología, basada en métodos de cálculo computacionales, para la cuantificación del proceso de sedimentación de limo en la zona adyacente a una toma de agua de refrigeración para una central termoeléctrica. La toma está ubicada en la desembocadura de un río y es afectada por un régimen de marea-eólico.

Se aplica un modelo hidrodinámico 2D en planta para obtener los campos de velocidades en la zona de estudio. La sedimentación se representa mediante un modelo desacoplado desarrollado especialmente para este problema. El modelo hidrosedimentológico resultante se calibra con datos de campo y se lo aplica para un estudio ingenieril particular.

### **ABSTRACT**

In this paper a methodology for the quantification of the siltation process in the region around a water intake for the refrigeration of a thermoelectric power plant, based on computational methods, is presented. The water intake is located at the mouth of a river and is affected by a tidal-eolic regime.

A 2D horizontal hydrodynamic model is used to obtain the velocity field at the study zone. Siltation is represented through a decoupled model specially developed for this problem. The resulting hydrosedimentologic model is calibrated with field data and is applied for a particular engineering study.

### **INTRODUCCION**

La captación de agua para múltiples usos, en las zonas ribereñas y costeras, tiene lugar a partir de diversos tipos de obras de toma. En algunos casos, el ingreso del fluido en la boca de toma debe ser continuo. Por ende, la toma debe estar proyectada para captar el líquido aún en condiciones extremas, como, por ejemplo, durante las épocas de estiajes agudos.

Una de las formas de lograr la continuidad del ingreso de fluido en la toma es mediante el emplazamiento de la boca a profundidad. Es común que la zona aledaña a la toma sea dragada a tal fin. Sin embargo, la acción del medio natural tiende a restituir la condición imperante antes del dragado, por lo cual en las adyacencias de la obra tiene lugar un proceso de sedimentación. La cuantificación de este fenómeno resulta de crucial importancia para determinar tanto la factibilidad del proyecto como el mantenimiento de la obra.

Si, además, la obra se emplaza en una zona sometida a un régimen de marea, el efecto del cambio periódico en las alturas de agua y las corrientes hace que la tasa de sedimentación se modifique continuamente. Esto da lugar a una dinámica muy rica desde el punto de vista físico, pero cuya representación resulta complicada.

En este trabajo, en particular, se presenta el estudio hidrosedimentológico de una obra de toma de agua para un nuevo circuito de refrigeración de la Central Térmica Costanera [1]. El estudio fue comisionado por Mitsubishi Heavy Industries Ltd. (encargada de la obra) al INA, a través del Laboratorio de Hidráulica y del Ambiente. La central mencionada está ubicada sobre la margen norte del Riachuelo, en su desembocadura en el Río de la Plata, esto es, en el límite sur este de la ciudad de Buenos Aires.

Para obtener información cuantitativa del proceso de sedimentación en este sistema de toma sumergida se ha optado por implementar un modelo hidrosedimentológico basado en técnicas de resolución numéricas. De este modo se pueden simular situaciones como la impermanencia, geometrías irregulares o diversidad de condiciones fluviales y marítimas, que con otras técnicas tradicionales se ven reducidas a promedios o valores fijos.

Para estudiar los efectos hidrodinámicos combinados se han utilizado tres modelos anidados, que permiten representar desde la hidrodinámica regional hasta el detalle de corrientes en la zona de interés. La cuantificación sedimentológica se llevó a cabo mediante un modelo matemático desarrollado especialmente para tal fin, el cual emplea como datos de entrada los campos hidrodinámicos previamente calculados y las características de los sedimentos transportados, en este caso básicamente limos. Como resultado de la aplicación combinada de estos modelos computacionales se obtienen mapas de sedimentación en la zona de toma, a partir de los cuales se ha podido garantizar la factibilidad del proyecto y predecir el volumen de material que se deberá dragar en el futuro, a los efectos del mantenimiento de la obra.

### DESCRIPCION FISICA DEL PROBLEMA

La hidrodinámica de la región de estudio está controlada esencialmente por el régimen mareo-océlico del Río de la Plata. Bajo condiciones normales, la influencia del Riachuelo resulta despreciable. Sólo durante eventos de crecida de la cuenca Matanza-Riachuelo algunos efectos pueden ser esperados.

La onda de marea oceánica tiene dos componentes: una de origen astronómico (de amplitud media 0.60 m y componente M2 dominante) y otra de origen meteorológica. En condiciones normales estas ondas generan corrientes de entre 0,20 y 0,70 m/s.

Los vientos locales producen fuertes crecidas y bajantes del río; en los eventos más fuertes las crecidas pueden superar el metro sobre el nivel medio, siendo entonces más importantes que los cambios astronómicos por estacionalidad.

Finalmente, la tercer fuerza motriz del sistema hidrodinámico se debe a los tributarios, principalmente los ríos Paraná y Uruguay, que aportan un caudal medio total de 22.000 m<sup>3</sup>/s, generando una corriente de deriva neta hacia el océano de unos 0,10 m/s.

Los sedimentos presentes en el Río de la Plata son aportados por los mencionados tributarios. Entre ellos, los más gruesos se depositan en el frente del Delta, debido a la expansión de la sección de flujo que reduce la capacidad de transporte en suspensión. Los más finos logran atravesar la zona del Delta, manteniéndose en suspensión gracias a las corrientes de marea y transportándose aguas abajo debido a la corriente de deriva. De todos modos, una fracción es depositada, por lo que se tiene un proceso continuo modulado por el ciclo hidrodinámico.

El mecanismo de deposición de sedimentos finos indica que en cualquier lugar donde las condiciones de flujo sean cercanas al estancamiento la tasa de sedimentación se vuelve significativa, produciendo una caída natural del material hacia el fondo. Este proceso es el responsable de rellenar las zonas dragadas y, por lo tanto, es el objeto del presente estudio.

### MODELO HIDRODINAMICO

Como la batimetría de la zona de estudio está caracterizada por bajas profundidades y pendientes suaves, para representar el ciclo hidrodinámico se empleó un modelo 2D horizontal, desarrollado y validado con anterioridad en el INA [2], basado en las ecuaciones para aguas poco profundas:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} - fvh + gh \frac{\partial}{\partial x} (h + z_0) + \\ + \frac{1}{\rho} (\tau_{fx} - \tau_{sx}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + fuh + gh \frac{\partial}{\partial y} (h + z_0) + \\ + \frac{1}{\rho} (\tau_{fy} - \tau_{sy}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

donde  $t$  es el tiempo,  $x$  e  $y$  las coordenadas horizontales,  $u$  y  $v$  las respectivas componentes de la velocidad media vertical,  $h$  la profundidad,  $z_0$  un nivel de referencia,  $f$  el parámetro geotrófico,  $g$  la gravedad,  $\rho$  la densidad,  $\tau_{fx}$  y  $\tau_{fy}$  las componentes de la tensión de corte contra el fondo,  $\tau_{sx}$  y  $\tau_{sy}$  las componentes de la tensión de corte contra la superficie libre (viento) y  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$  y  $\tau_{yy}$  las tensiones efectivas (debidas a contribuciones viscosas, turbulentas y convectivas).

Estas ecuaciones se resuelven mediante una discretización en diferencias finitas utilizando un método implícito de direcciones alternadas. Los términos convectivos se descentran (esquema aguas arriba) para lograr mayor estabilidad. La no linealidad es tratada mediante una técnica iterativa. Más detalles se pueden obtener de la referencia [2].

El modelo hidrodinámico se implementó en las zonas indicadas en la figura 1, obteniéndose un sistema de modelos anidados. El objeto de este procedimiento es el de utilizar las condiciones de borde disponibles en el Río de la Plata exterior (modelo "regional", de 3 km x 2 km de extensión) para generar condiciones de borde en áreas interiores hasta llegar a la zona de detalle adyacente a la toma de agua (modelo "de detalle", de 560 m x 650 m). Para ello se realizó un análisis estadístico de las condiciones de marea y viento en el Río de la Plata, y se obtuvieron escenarios representativos [1]. Los mismos se caracterizaron mediante alturas de agua y caudales en los límites del modelo regional (fig. 1). El ciclo de marea se representó mediante una sucesión de 11 estados estacionarios (método cuasiestacionario). Por ejemplo, en una situación de creciente, en el borde NO se impone la altura local de agua y en el borde SE el caudal entrante. El borde NE es considerado una línea de corriente mientras que el último contorno del modelo lo constituye la boca del Riachuelo (lado SO), donde se impone el caudal.

Las salidas del modelo regional sirven para determinar las condiciones de borde del modelo "local", el cual representa el detalle en la península donde está ubicada la central. En esta escala se observó que, además de la acción del río y la marea, la zona presenta una circulación propia debida a las tomas y descargas de la central térmica. Finalmente, las salidas del modelo local se utilizan para disponer de condiciones de borde para el modelo de detalle, del mismo modo que antes.

En la escala del modelo de detalle (se utilizó un paso espacial de discretización de 6,25m) se puede observar el patrón de corrientes combinado debido a la acción conjunta de marea, viento, deriva y obras de toma y descarga. Por ejemplo, la figura 2 presenta el campo de velocidades para una condición de bajante del Río de la Plata. En la parte superior de la figura se observa una corriente neta, en la dirección NO-SE, debida a la condición de bajante del río. La misma disminuye su intensidad al penetrar en el canal de navegación (indicado en línea quebrada en la figura 1). Hacia la costa de la central aparece una corriente convergente debida a la futura obra de toma. En la esquina inferior izquierda de la figura el patrón de velocidades que rodea la central es debido a la llamada de las tomas actuales (fuera del modelo). Finalmente, en el borde derecho aparecen recirculaciones originadas por la geometría del puerto. Nótese que la acción del Riachuelo (borde inferior) es despreciable, de acuerdo a lo manifestado anteriormente.

### MODELO SEDIMENTOLOGICO

Las cargas de lavado que transporta el Río de la Plata se presentan en concentraciones lo suficientemente bajas como para despreciar el efecto de las partículas sobre el ciclo hidrodinámico. Esto es, la hidrodinámica se puede resolver independientemente del transporte de sedimentos, el cual ocurre en forma pasiva.

Para partículas sumergidas en un fluido en reposo, la tasa de sedimentación se expresa como:

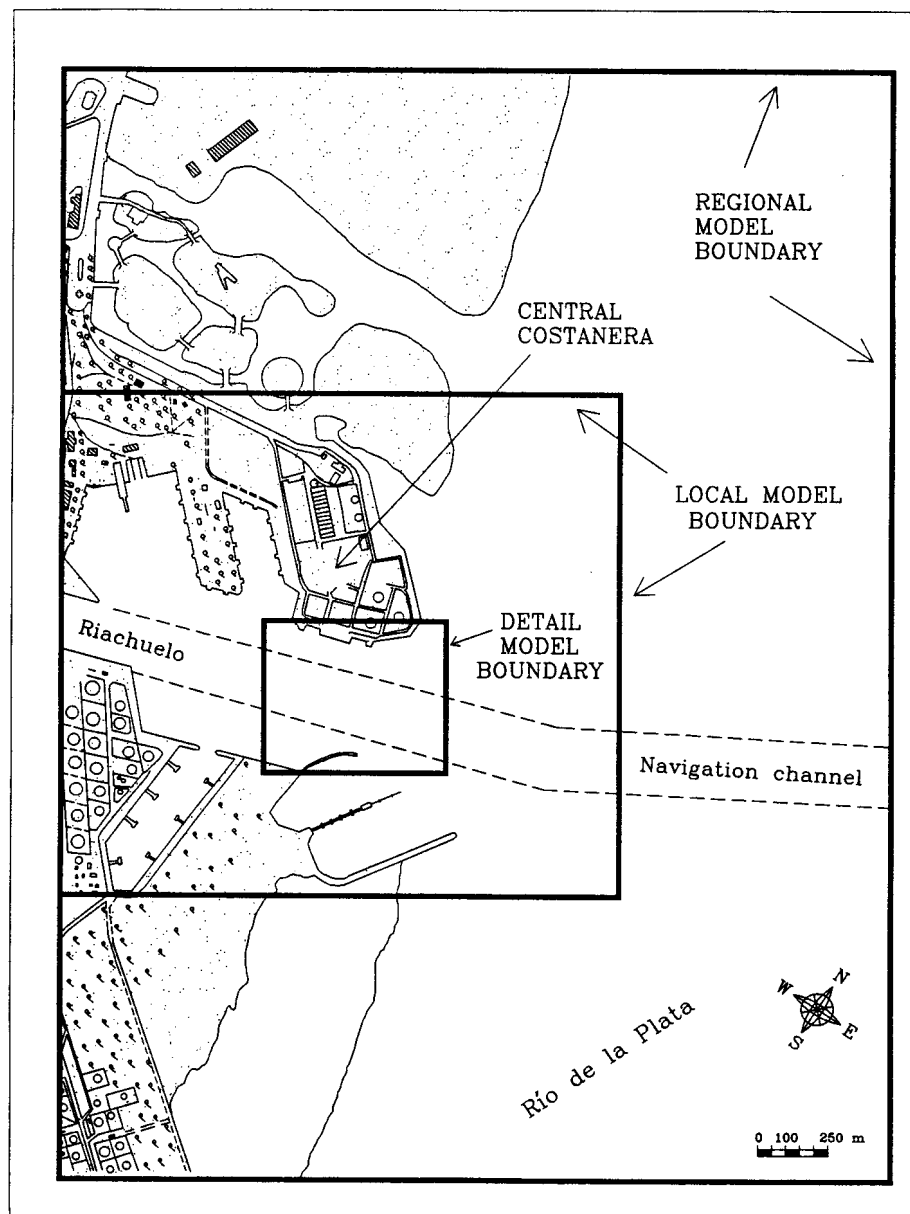


Figura 1 - Ubicación de los contornos de los modelos anidados.

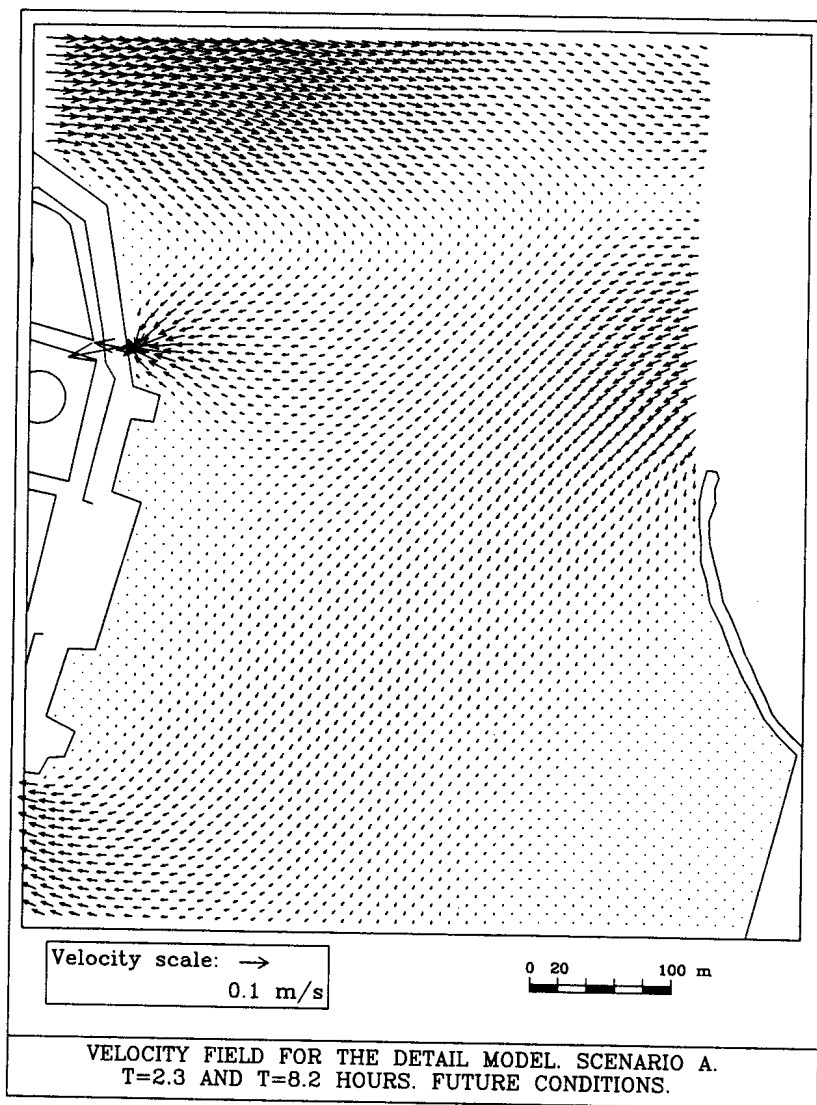


Figura 2 - Campo de velocidades del modelo de detalle para situación de bajante

$$\frac{dz}{dt} = \frac{cw_s}{1 - \pi} \quad (4)$$

donde  $z$  indica la posición del lecho,  $c$  es la concentración volumétrica,  $w_s$  es la velocidad de caída para sedimentos de diámetro representativo medio y  $\pi$  la porosidad del material. Esta expresión se debe generalizar para el caso de fluido en movimiento: por un lado, el movimiento del fluido induce el estado de suspensión y, por el otro, si las corrientes son lo suficientemente intensas, las partículas depositadas son removidas del fondo rápidamente.

Ahora, cuando los sedimentos son finos (diámetros característicos inferiores a los 60 micrones, aproximadamente) las propiedades cohesivas provenientes de efectos físico-químicos comienzan a ser importantes. Las partículas presentan un comportamiento creciente hacia la cohesión cuando el diámetro disminuye: sólo las fuerzas de corte efectivas en el fondo se oponen a esta tendencia. Una forma simplificada de tener en cuenta este efecto cohesivo proviene de eliminar del modelo la posibilidad de erosión. Esto es, las partículas que llegan al lecho se adhieren y no pueden ser removidas.

Para determinar cuántas partículas llegan al lecho se puede utilizar una función de "probabilidad de deposición",  $\phi$  [3], de tal manera de generalizar la expresión (4) mediante:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{cw_s}{1 - \pi} \phi \left( \frac{u_*}{u_{c,d}} \right) \quad (5)$$

con

$$\phi \left( \frac{u_*}{u_{c,d}} \right) = \begin{cases} 0 & \text{si } u_* > u_{c,d} \\ 1 - \left( \frac{u_*}{u_{c,d}} \right)^2 & \text{si } u_* < u_{c,d} \end{cases} \quad (6)$$

donde  $u_*$  es la velocidad de corte y  $u_{c,d}$  el valor crítico de la velocidad de corte. Estas expresiones indican que las partículas sólo se depositan si las condiciones hidrodinámicas locales son tales que las velocidades están por debajo de un cierto umbral. Si el umbral se supera todas las partículas continúan como carga de lavado, sin deposición neta. Obsérvese que la conexión entre el modelo hidrodinámico y el sedimentológico se realiza a través de las velocidades de corte locales.

De este modo, para determinar la tasa de sedimentación local se desarrolló un modelo 2D en planta que utiliza como entrada la salida del modelo hidrodinámico [4]. Los valores de los parámetros sedimentológicos ( $c$ ,  $w_s$ ,  $\pi$  y  $u_{c,d}$ ) fueron considerados uniformes a través de la región de estudio. De acuerdo a tareas de campaña realizadas en la zona de interés se determinó un valor representativo de concentración media de 35 mg/l. Aunque existe cierta discrepancia en la literatura en la determinación de la velocidad crítica de deposición, se empleó un valor de 8.4 mm/s de acuerdo al trabajo de Ziegler [5] y experiencias anteriores en el Río de la Plata. De análisis propios ha surgido que en la zona de estudio la porosidad de los depósitos de fondo es de 0.8. El parámetro remanente es la velocidad de caída, que resulta así el parámetro de control para el proceso de sedimentación.

### CALIBRACION Y PREDICCIONES SEDIMENTOLOGICAS

Se realizaron corridas del modelo en la situación sin nueva toma de agua y se determinó la tasa de sedimentación mensual. Esto último se llevó a cabo mediante un promedio pesado de las tasas obtenidas para cada una de las 11 etapas en que se dividió un ciclo de marea. Cada peso era proporcional al intervalo temporal asignado a cada etapa. Estos resultados se compararon con tasas obtenidas de mediciones de campo, en dos zonas diferentes. La tabla I presenta los resultados para dos diámetros representativos diferentes. Se estableció que el diámetro mayor (30  $\mu\text{m}$ ) estaba en mejor acuerdo con los datos, pero resultaba algo elevado en relación a las curvas granulométricas disponibles. Por ello las predicciones se realizaron con ambos diámetros, de manera de tener una medida de la incertidumbre asociada a ellas.

Tabla I - Comparación entre tasas medidas y calculadas.

Zona	Tasa medida (m/mes)	Tasa calculada (m/mes) d=15 $\mu\text{m}$	Tasa calculada (m/mes) d=30 $\mu\text{m}$
Canal de navegación	0,09 a 0,15	0,030	0,13
Canal acceso dock	0,12 a 0,20	0,033	0,14

Procediendo del mismo modo se realizaron las predicciones de sedimentación para la situación con la nueva obra de toma. La misma estaba acompañada por el dragado de un pequeño canal rectangular a -4m IGM. Este canal era de 12,5 m de ancho y 44 m de largo, ubicado de tal forma que el mayor lado es perpendicular a la línea de la costa en la boca de la toma. La figura 3 muestra las curvas de isosedimentación en el caso de limo de 30  $\mu\text{m}$ . Se observa que cerca de la toma aparece una zona con ausencia de sedimentación, debido a la aceleración local del flujo que converge a la toma propiamente dicha. Esta zona tiene una extensión de unos 15 m. Se ha verificado que las velocidades generadas en la boca de la toma no son suficientes como para provocar fenómenos erosivos significativos. Además, en la misma figura se aprecia el impacto de la obra, que abarca toda la zona con tasas inferiores a las que había en el caso sin toma (del orden de los 0,13 m/mes).

Aunque parte del canal dragado resulta "autolimpiante", a medida que se aleja de la toma la tasa de sedimentación sobre el canal dragado crece. Esto se observa en la figura 4, que presenta la tasa de deposición a lo largo del canal. Se aprecia un rápido crecimiento de la tasa más allá de la zona autolimpiante. A su vez, la diferencia entre ambos diámetros ensayados resulta significativa, de acuerdo a lo mencionado anteriormente. Integrando estas curvas se obtiene el volumen mensual a dragar, resultando de entre 7,5 y 28  $\text{m}^3/\text{mes}$  para diámetros de 15 y 30  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

### CONCLUSIONES

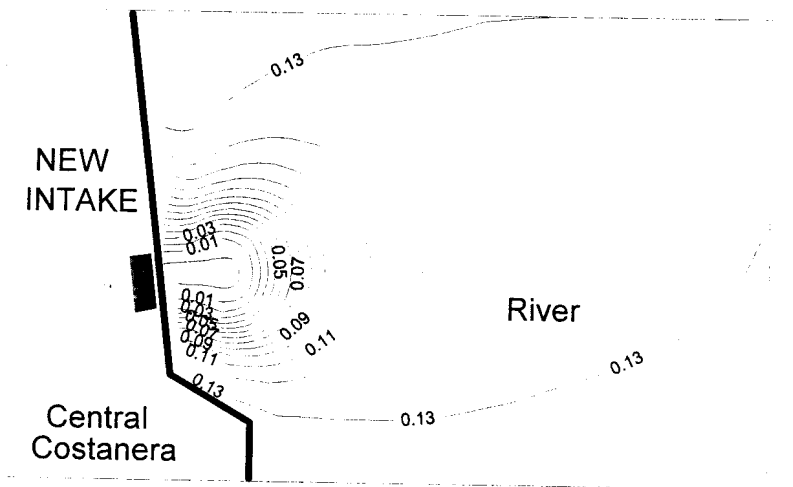
Mediante el uso de modelos computacionales validados apropiadamente se ha podido dar respuesta al problema del impacto que genera, desde el punto de vista de la sedimentación, una obra de ingeniería como la de toma de agua para refrigeración de centrales termoeléctricas. Entre los resultados obtenidos se cuentan las tasas de sedimentación en la zona de obra y el pronóstico del dragado de mantenimiento.



Las propiedades físicas del fenómeno bajo estudio permiten desacoplar el transporte de sedimentos de la hidrodinámica. De este modo, se ha podido generar una herramienta de predicción muy eficiente desde el punto de vista computacional. Los resultados obtenidos presentan ciertas incertidumbres, las cuales son del orden de magnitud de los errores de medición en tareas de campaña para este tipo de problemas. Por ello, las simulaciones realizadas poseen alta calidad desde el punto de vista ingenieril.

#### REFERENCIAS

- [1] "Hydraulic Studies for the Water Intake of Central Costanera", informe LHA 01-155a.-97, realizado para Mitsubishi Corporation, (1997).
- [2] Menéndez, A.N., "Sistema Hidrobid II para Simular Corrientes en Cuencos", Revista Int. de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, Vol. 6, 1, 25-36 (1990).
- [3] Partheniades, E., "Estuarine Sediment Dynamics and Shoaling Processes", Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Vol. 3, J.B. Herbich (editor), Gulf Pub. Company (1992).
- [4] Tarela, P.A., "Desarrollo de un modelo 2D en planta para transporte y deposición de sedimentos, Parte II: Sedimentos cohesivos", (en preparación).
- [5] Ziegler, K.C., Nisbet, B.S., "Long-Term Simulation of Fine-Grained Sediment Transport in Large Reservoirs", Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 11, (nov. 1995)



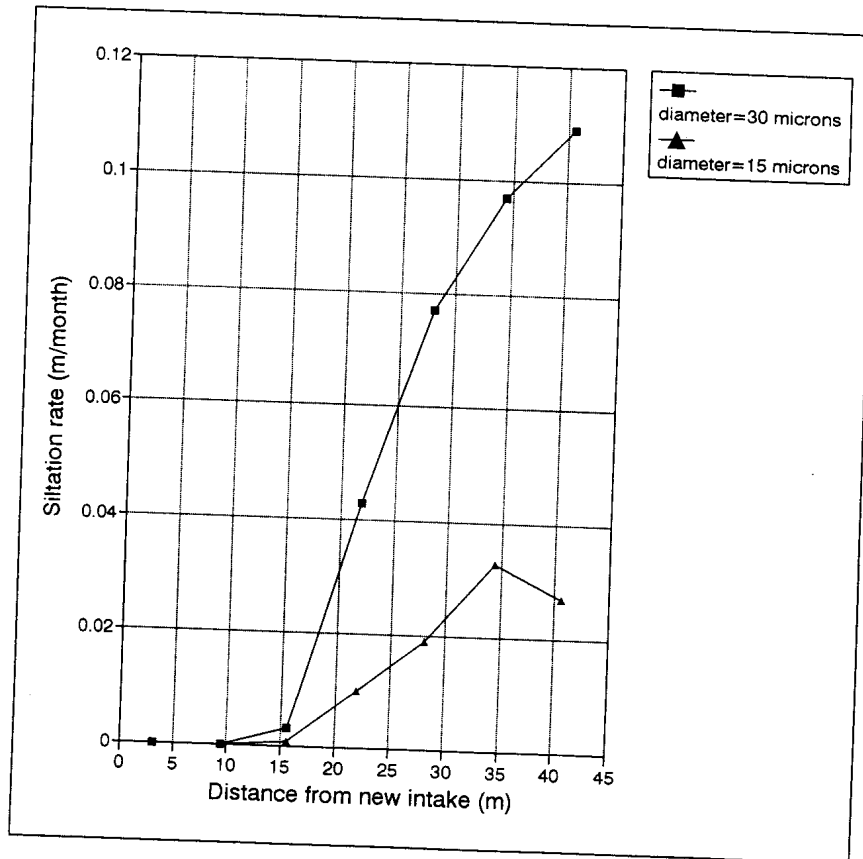


Figura 4 - Tasa de sedimentación en el canal dragado de toma.