

## METODOLOGÍA DE MODELACION DEL TRANSPORTE DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN RESERVORIOS

C.U. Álvarez Tagliabue<sup>1</sup>, A.N. Menéndez<sup>1</sup>, M. Perayre<sup>2</sup>, M. Cardinali<sup>2</sup>, L. Chamorro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional del Agua (INA), <sup>2</sup>Entidad Binacional Yacyretá (EBY)

INA, Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto Ezeiza, Argentina, (54-11) 4480-4500, [cuat@ina.gov.ar](mailto:cuat@ina.gov.ar)

### RESUMEN

Se presenta una metodología de simulación numérica para el transporte de sólidos suspendidos en un reservorio. Esta consiste en la aplicación sucesiva de un modelo hidrodinámico euleriano y un modelo de transporte lagrangiano. En ambos casos, se trata de modelos bidimensionales en el plano horizontal, válidos para reservorios no estratificados. La metodología se ilustra a través de su aplicación al embalse de Yacyretá.

La calibración de base del modelo hidrodinámico se efectúa utilizando los datos de caudal y niveles de agua para diferentes escenarios hidrodinámicos. Su verificación y ajuste se lleva a cabo comparando las velocidades medias verticales predichas con el modelo con mediciones de perfiles de velocidades efectuados con un velocímetro Doppler.

Para calibrar el modelo de transporte de sólidos, previamente se efectúa un elaborado proceso de filtrado de las series de caudales sólidos ingresantes y egresantes del embalse utilizando la técnica de SSA (Singular Spectrum Analysis). De ese filtrado surgen series que resuelven hasta la escala de variación estacional, que son las elegidas para el modelado.

El carácter lagrangiano del modelo de transporte evita la introducción de dispersión espuria, como es el caso de los métodos eulerianos, preservando entonces la identidad de los corredores de transporte a lo largo del reservorio.

La calibración del modelo se efectúa para varios escenarios con distintas condiciones hidrodinámicas y de aporte. Se obtienen leyes de calibración para los dos parámetros de ajuste: el tamaño medio de las partículas y un coeficiente de distribución lateral.

El modelo se aplica para representar la sedimentación de sólidos suspendidos para la situación presente, y para predecir la futura sedimentación a cota 83 msnm.

**Palabras Clave:** Embalse Yacyretá – Modelo Hidrodinámico – Transporte Sólidos

## INTRODUCCIÓN

Como para todo embalse, la calidad del agua es una de las cuestiones fundamentales a atender en el embalse de Yacyretá. Interesa tanto un diagnóstico bajo las condiciones actuales de operación como un pronóstico para la situación futura, con el nivel del embalse elevado a la cota final o a valores intermedios, que se correspondan con el plan de llenado final.

Las sustancias contaminantes que llegan hasta las aguas del embalse, ya sean de origen natural o relacionado a la actividad antrópica, son transportadas por las corrientes y difundidas por la turbulencia. Eventualmente, también pueden sufrir reacciones químicas, bioquímicas o biológicas que las transformen. Lo ideal es poder representar adecuadamente cada uno de estos procesos mediante modelos matemáticos, de modo de obtener las respuestas cuantitativas del sistema a esas solicitaciones.

Si bien el mecanismo primario de transporte de contaminantes en el embalse de Yacyretá son las corrientes de agua, los sólidos suspendidos constituyen uno de los vehículos fundamentales de ese transporte, a través de su capacidad de sorber muchos de esos elementos. Como una parte de los sólidos suspendidos decanta en el embalse, su seguimiento es fundamental para determinar, entonces, el destino de esos contaminantes.

En el presente trabajo se describe la implementación y calibración de un modelo de transporte de sólidos suspendidos en el embalse de Yacyretá. Este se motoriza a partir de los campos de corrientes de agua provistos por el modelo hidrodinámico global EBY-INA I implementado en base al software HIDROBID II, que también se describe en lo que sigue.

Más detalles de este trabajo se pueden encontrar en informes internos del INA (Álvarez Tagliabue & Menéndez, 2003a, 2003b, 2003c) y en la tesis de Ingeniería Civil de Álvarez Tagliabue (2004).

## IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO

### Descripción del modelo matemático y del esquema numérico

El embalse de Yacyretá, figura 1, puede ser dividido en cuatro secciones (figura 2), en función de las características de régimen hidrodinámico. Se identifica una primera “zona fluvial”, donde las velocidades y pendientes del pelo de agua son semejantes a las del río en régimen libre. Le sigue una “zona de transición”, donde se sienten significativamente los efectos de remanso. A continuación, se desarrolla la “zona lacustre”, caracterizada por bajas velocidades y bajos gradientes hidráulicos. Finalmente, en la “zona de descarga” las corrientes se incrementan, afectadas por la operación de la central y/o los vertederos de la presa. El mismo tiene una extensión del orden de los 100 km. Su ancho en el vaso principal es del orden de los 30 km, disminuyendo a alrededor de los 10 km en la zona de transición hacia la zona de régimen fluvial. A su cota actual de 76 m (sobre el cero del IGM), las profundidades máximas son de alrededor de los 15 m, las cuales llegarán entonces hasta los 22 m cuando opere a cota 83 m. La comparación entre las dimensiones horizontales y las verticales del flujo lleva rápidamente a la conclusión que la dinámica del sistema cae en la categoría de aguas poco profundas. Entonces, en ausencia de estratificación térmica intensa (como de hecho sucede y sucederá, tal como se discute en Morillo & Tarela, 2002), puede utilizarse una descripción integrada en la vertical, o sea, el movimiento puede ser descrito por las conocidas ecuaciones para aguas poco profundas en Abbott (1979).

La resolución numérica de esas ecuaciones se encuentra implementada en distintos software, algunos de uso público y otros de dominio privado. En el presente estudio se utilizó el software HIDROBID II, desarrollado en el INA por Menéndez (1990), basado en el método de las diferencias finitas y cuyas características técnicas se describen a continuación.



*Figura 1 Embalse de Yacyretá a cota 76 metros*

El software HIDROBID II apunta a la simulación matemática de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre, y es apto para la simulación de escurrimientos en régimen impermanente en cuencos de topografía arbitraria. El modelo admite tres tipos de contornos: costa, de entrada y de salida. La geometría de la costa puede ser arbitraria y el dominio de cálculo sobre el que se extiende la malla puede ser múltiplemente conexo (es decir se admiten islas).



*Figura 2 Zonificación del embalse*

El modelo hidrodinámico está basado en una formulación bidimensional, integrada en la vertical, de las ecuaciones de Navier-Stokes, bajo la hipótesis de aguas poco profundas y flujo turbulento, Abbott (1979). Las ecuaciones resultantes que gobiernan la hidrodinámica son:

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

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

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

donde  $t$  es el tiempo,  $x$  e  $y$  las coordenadas horizontales,  $u$  y  $v$  las respectivas componentes de la velocidad media vertical,  $h$  la altura de la superficie libre,  $z_0$  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).

El esquema numérico utilizado para resolver las ecuaciones diferenciales anteriores desarrollado por Menéndez (1985), está basado en las diferencias finitas y se trata del método de las direcciones alternadas. El esquema consiste en una malla de discretización espacial alternada, debido a que las variables  $h$ ,  $u$  y  $v$  están centradas en distintos puntos (ver figura 3), lo que es óptimo para aplicar las condiciones de borde. El método es implícito, es decir que las incógnitas no se pueden despejar, pero tiene ventajas como la estabilidad. En el primer paso fraccionario los términos implícitos corresponden a las derivadas según  $x$  y los explícitos a las derivadas según  $y$ . Esto se invierte en el segundo paso fraccionario. La elección de un método implícito es conveniente a fin de evitar la restricción impuesta por la condición de Courant,  $\Delta t < \Delta x / u \pm (g \cdot h)^{1/2}$ , a los métodos explícitos, donde  $\Delta t$  y  $\Delta x$  son pasos temporal y espacial de la grilla respectivamente, y  $\Delta x / \Delta t$  la denominada velocidad numérica.

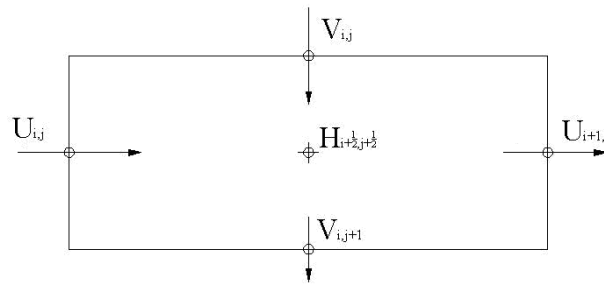


Figura 3 Celda de cálculo

La implementación del modelo hidrodinámico del embalse, en base al software elegido, requiere la especificación del modelo numérico del terreno y la geometría, la caracterización de los mecanismos de disipación de energía y el establecimiento de los forzantes que provocan el movimiento del agua y de los condicionantes que le impiden fluir libremente. En las secciones siguientes se identifican y describen estos aspectos para el problema particular del embalse de Yacyretá.

## **Generación del modelo numérico del terreno**

Con los datos de base provistos se emprendió la construcción del modelo numérico del terreno, es decir la representación del terreno en valores numéricos nodales, que sirven de dato para la resolución de las ecuaciones hidrodinámicas.

En la primera etapa se utilizaron los datos históricos para construir el modelo numérico del terreno. Mediante un utilitario de computación, se obtuvo una malla regular con una cota de elevación en cada nodo, la cual surge de una interpolación usando una técnica "kriging". Las celdas de la malla son cuadrangulares, de 250 m en la dirección este (coordenada X de Gauss-Krüger) y de 100 m en la dirección norte (coordenada Y). De esta manera, la malla de discretización para cubrir desde Garupá hasta la presa está compuesta por 399 celdas en la dirección X y 461 celdas en la dirección Y, esta discretización estuvo condicionada por el poder de cálculo de las máquinas con las que se cuenta al tiempo de la realización del presente estudio

En la segunda etapa se partió de la base del modelo de la EBY. El procesamiento de estos datos se efectuó en forma similar a la anterior. Esta batimetría no llega a cubrir hasta la desembocadura del arroyo Garupá, el cual fue seleccionado como comienzo del modelo.

Para la tercera etapa se utilizó como base la malla construida en la segunda etapa, y se efectuaron correcciones manuales para ajustar la batimetría de modo de resultar compatible con la relevada en las secciones transversales.

## **Condiciones de borde**

La geometría del embalse está definida, en parte, naturalmente por la topobatimetría de la zona y, en parte, artificialmente por los cierres provocados por la obra.

Los cierres fueron levantados de imágenes satelitales, y digitalizados para poder ingresarlos como condición de borde geométrica del modelo.

El único tipo de disipación considerada es la debida a la acción del fondo, que genera torbellinos de eje horizontal en dirección lateral al flujo principal. Esta disipación se caracteriza a través del coeficiente de rugosidad de Manning. Un valor típico de este coeficiente para el fondo del río Paraná es  $0,025 \text{ s/m}^{1/3}$ , que fue el valor utilizado de partida.

El forzante dominante del movimiento del agua a través del dominio del modelo es el caudal del río Paraná, ingresante en el borde de aguas arriba. La acción del viento sobre la superficie del agua resulta secundaria (esto fue verificado con el propio modelo).

La EBY proveyó la serie diaria de caudales ingresantes al embalse para el período que se extiende desde el 01/Ene/1991 hasta el 17/Dic/2002.

Con esta serie se efectuó un análisis estadístico básico, se obtuvo que el caudal medio es de alrededor de  $15.000 \text{ m}^3/\text{s}$  y la desviación estándar de alrededor de  $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La serie de caudales ingresantes fue utilizada como condición de borde de aguas arriba del modelo.

El libre escurrimiento del agua está impedido por la obra, que condiciona el nivel aguas abajo del modelo, produciendo un efecto de remanso.

Se dispuso de la serie diaria de niveles y caudales en ambas salidas: el Brazo Principal (BP) y el Brazo Aña-Cuá (BAC), las cuales se inician básicamente desde el comienzo del llenado del embalse (01/Ene/1993). Se observó que desde el año 2002 el caudal erogado por el Brazo Aña-Cuá es mantenido prácticamente constante a 1500 m<sup>3</sup>/s, que es el caudal ecológico establecido, ya que allí no existe central de generación hasta ahora, pero existe un proyecto para instalar una, y así turbinar ese caudal ecológico. El nivel en el embalse varía muy poco alrededor de una cota algo inferior a 76 m, con el objetivo de maximizar la capacidad de generación eléctrica.

El caudal saliente por el vertedero del Brazo Aña-Cuá y el nivel en el brazo principal del río son, precisamente, los condicionantes del escurrimiento del agua en el dominio del modelo, por lo cual se utilizaron como condiciones de borde aguas abajo del modelo.

## **CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO**

### **Definición de escenarios**

Calibrar el modelo hidrodinámico significa poder predecir la respuesta del sistema a la acción de los forzantes con relativa precisión, para condiciones en las cuales se dispone de datos suficientes para caracterizar tanto a los forzantes como a esa respuesta, de modo de poder comparar las predicciones con las mediciones.

En el presente caso, se dispuso de dos ítems de información para calibrar el modelo, ambos provistos por la EBY:

- a) La serie de niveles diarios en la ciudad de Posadas, que caracteriza el efecto de remanso.
- b) Mediciones de perfiles de velocidades en secciones transversales, para caudales similares del río, efectuados en oportunidad del estudio de sedimentación (NHC et al, 2002).

Para la calibración se seleccionaron días particulares para los cuales se dispuso de toda la información hidrométrica. Se especificaron la descarga por el brazo Aña-Cuá y el nivel del embalse en el brazo principal correspondientes a ese día como condiciones de borde aguas abajo.

Dado el carácter cinemático del flujo y la corta extensión del modelo en relación con la longitud de las ondas de crecida del río, es lícito utilizar una aproximación de flujo cuasi-estacionario, por lo que cada corrida fue efectuada en régimen estacionario.

Como mecanismos de calibración se dispuso de:

- i. La rugosidad del fondo, eventualmente zonificada.
- ii. La batimetría del fondo, ya que la base de datos no la representa con precisión, al menos en su estado actual.

La variación de la batimetría del fondo se llevó a cabo de modo de tender a una consistencia con los perfiles de velocidades medidos, en cuanto a intensidad y forma del perfil.

Al mismo tiempo, se debió tener en cuenta que el aumento del área de flujo disminuye la impedancia del sistema y, en consecuencia, se traduce en una disminución del nivel de agua y viceversa. Es decir que no se obtuvo un modelo numérico del terreno final, con el cual se calibró el modelo, sino que fue un proceso simultáneo de calibración-corrección del modelo hidrodinámico y del modelo numérico del terreno.

Por su parte, variando la rugosidad, caracterizada por el coeficiente  $n$  de Manning, puede controlarse la pendiente general del escurrimiento, produciendo un reajuste de toda la superficie libre.

Como primeros tres escenarios de calibración, denominados E01, E02 y E03, se seleccionaron tres días particulares para los cuales se dieron aproximadamente el caudal medio (15.000 m<sup>3</sup>/s), un caudal bajo (alrededor de 10.000 m<sup>3</sup>/s, obtenido como el valor medio menos la desviación estándar) y uno alto (alrededor de 20.000 m<sup>3</sup>/s, obtenido como el valor medio más la desviación estándar). El resto de los escenarios corresponden a los días en que se efectuaron las mediciones de los perfiles de velocidades: E04 para el Corte 1; E05 para los Cortes 10, 11 y 12; E06 para los Cortes 3 y 4; E07 para los Cortes 5 y 6; E08 para los Cortes 7, 8 y 9; E09 para el Corte 2. El Corte 12 está ubicado fuera de los límites de la simulación, es decir aguas arriba de Garupá.

En la tabla 1 se indican los datos hidrométricos correspondientes a los escenarios de calibración.

*Tabla 1 Escenarios de calibración*

Escenario	Fecha	Caudal Ingresante (m <sup>3</sup> /s)	Caudal BAC (m <sup>3</sup> /s)	Nivel BP (m)
E01	07/Ago/2001	10.007	1.533	75,63
E02	11/Feb/2002	15.111	2.223	75,63
E03	31/Ene/2002	19.795	6.980	75,74
E04	19/Sep/2001	9.015	1.534	75,66
E05	20/Sep/2001	9.438	1.535	75,67
E06	31/Oct/2001	10.752	1.504	75,03
E07	01/Nov/2001	11.203	1.499	75,25
E08	02/Nov/2001	11.077	1.500	75,29
E09	08/May/2002	11.833	1.535	75,60

### **Resultados de la calibración**

Para la calibración no fue necesario zonificar el coeficiente de rugosidad de Manning, adoptándose finalmente un valor uniforme de 0,020 s/m<sup>1/3</sup>. En la figura 4 se muestra la batimetría final resultante del proceso de calibración anteriormente descrito.

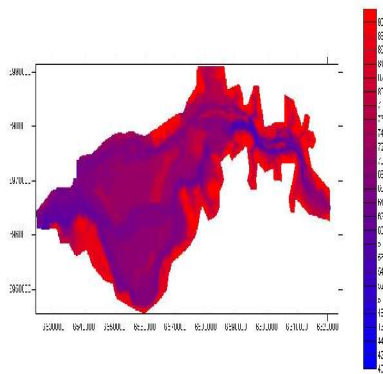


Figura 4 Batimetría final

En la tabla 2 se presenta el nivel del pelo de agua en Posadas de acuerdo al modelo para los tres primeros escenarios, donde se observa el grado de acuerdo con el correspondiente nivel medido en Posadas. Se observa que el modelo tiende a sobreestimar para caudales bajos y a subestimar para caudales medios y altos. No resultó posible corregir estas desviaciones, más allá de lo mostrado, al mismo tiempo.

Tabla 2 Acuerdo entre niveles medidos y calculados en Posadas

Escenario	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Nivel Medido (m)	Nivel Calculado (m)	Diferencia (cm)
E01	10.000	76,32	76,43	+11
E02	15.000	76,86	76,84	-2
E03	20.000	77,31	77,28	-3

### Validación en régimen impermanente

Como una suerte de validación del modelo, se efectuó una corrida prolongada en régimen impermanente (simulación dinámica). Se tomó el intervalo de tiempo comprendido entre el 15/Dic/2001 y el 11/Mar/2002, es decir unos 87 días de simulación. La figura 5 muestra la comparación entre las series temporales de los niveles calculados y medidos, observándose un acuerdo general satisfactorio. Las diferencias caen dentro del margen establecido en la calibración.



Figura 5 Comparación de niveles medidos y calculados en Posadas

## EXPLOTACIÓN DEL MODELO HIDRODINÁMICO

### Distribución de velocidades

Luego de tener el modelo calibrado satisfactoriamente, se plantean distintos escenarios para la obtención de resultados. Estos escenarios corresponden a caudales de 10.000, 15.000, 20.000, 30.000 y 40.000 m<sup>3</sup>/s. Siguiendo con la numeración de escenarios introducida en el capítulo antecedente, en la tabla 3 se indican las características de los escenarios para los cuales se efectuaron ensayos con el modelo ajustado.

Tabla 3 Escenarios de ensayo

Escenario	Caudal Ingresante (m <sup>3</sup> /s)	Caudal BAC (m <sup>3</sup> /s)	Nivel BP (m)
E08a	10.000	1.500	76,00
E08b	10.000	1.500	83,00
E09a	15.000	1.500	76,00
E09b	15.000	1.500	83,00
E10a	20.000	7.000	76,00
E10b	20.000	7.000	83,00
E11a	30.000	10.000	76,00
E11b	30.000	10.000	83,00
E12a	40.000	10.000	76,00
E12b	40.000	10.000	83,00

En las figuras 6 y 7 se presentan, a modo de ejemplo, zonas de isovelocidad para los escenarios de caudal medio ensayados con el modelo a cota 76 m y 83 m. Se observa que las altas velocidades que se desarrollan en la zona de transición para cota 76 m, se reducirán significativamente para cota 83 m.

Se observa en la figura 6 que en la zona fluvial la velocidad media es del orden de 1 m/s, en la zona de transición ella baja a alrededor de 0,5 m/s, y en el vaso principal baja bruscamente a un valor del orden de 0,1 m/s. Para los caudales más altos (30.000 y 40.000 m<sup>3</sup>/s) se nota un incremento de la velocidad media en la zona de transición. En todos los casos se distinguen dos corredores de flujo donde la velocidad es mayor, que se corresponden con los antiguos cauces fluviales (brazo Aña-Cuá y brazo principal).

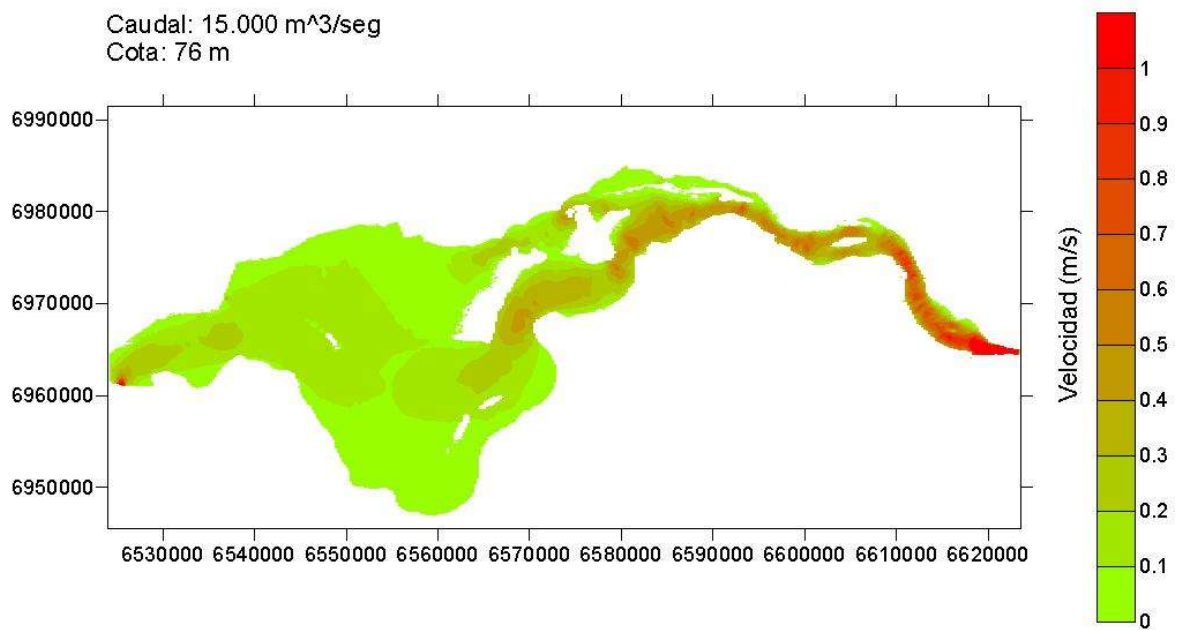


Figura 6 Zonas de isovelocidades para escenario E09b a cota 76 m.

Para cota 83 m (figura 7) se observa una marcada atenuación de la velocidad media en las zonas fluvial y de transición, que cae a alrededor de 0,7 y 0,3 m/s, respectivamente, manteniéndose una velocidad media del orden de 0,1 m/s en el vaso principal. Para los dos caudales más altos (30.000 y 40.000 m<sup>3</sup>/s), las velocidades medias en la zona fluvial y de transición aumentan a alrededor de 0,8 m/s y 0,4 m/s, respectivamente.

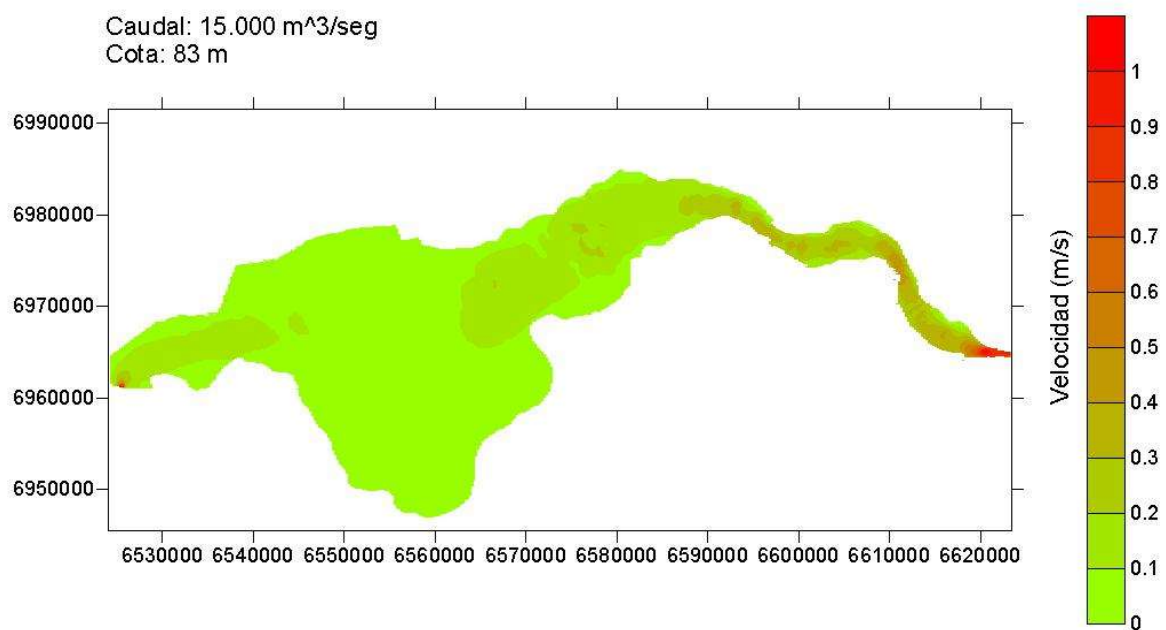


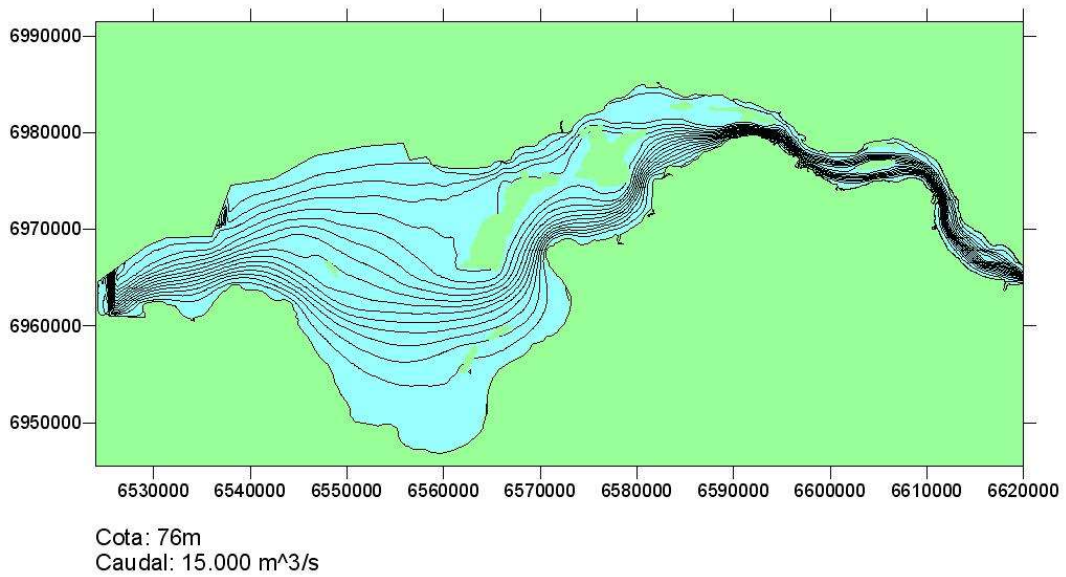
Figura 7 Zonas de isovelocidades para escenario E09b a cota 83 m

### **Tubos de flujo**

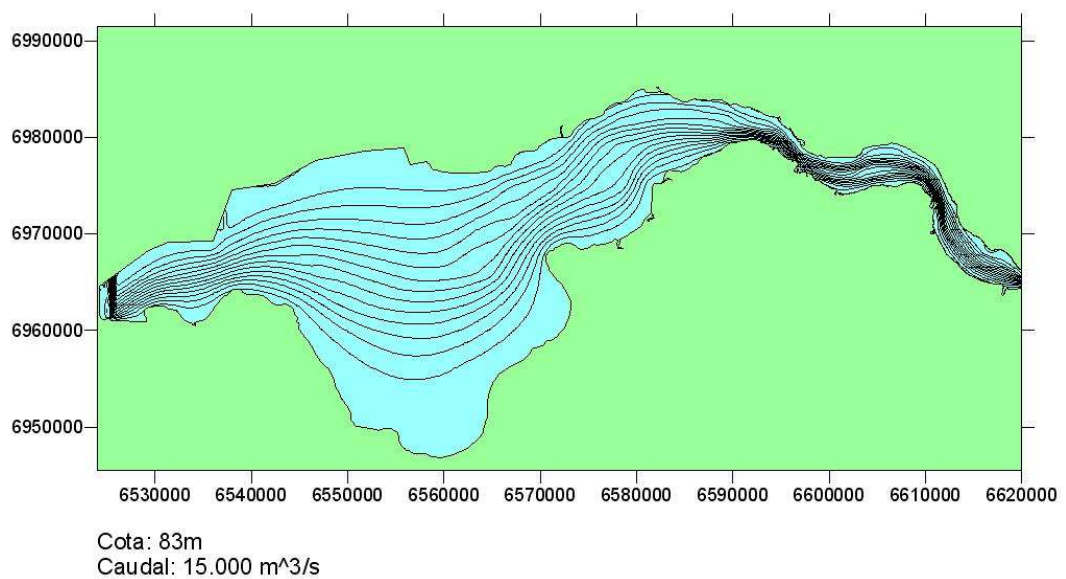
Los tubos de flujo constituyen corredores limitados por líneas de corriente que transportan una cantidad definida de caudal. Ellos proveen una indicación clara de cuáles son las zonas con mayor transporte. Pueden construirse fácilmente a partir de los campos de velocidades provistos por el modelo hidrodinámico.

Las figuras 8 y 9 presentan los tubos de flujo de  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondientes a los escenarios de caudal medio a cota 76 m y 83 m. Para cota 76 m (figura 8) se distinguen claramente dos corredores principales de flujo, asociados a los cauces originales del río Paraná: brazo principal y brazo Aña-Cuá, con preponderancia del transporte en el primero de ellos, como era de esperarse.

La figura 9 presenta los resultados correspondientes a cota 83 m. Se observa un cambio cualitativo respecto de la situación a cota 76 m, ya que ahora se distingue básicamente un sólo corredor de flujo, centrado sobre el eje medio del embalse. Es de esperarse que este cambio produzca efectos significativos sobre el transporte y deposición de sedimentos y contaminantes en el embalse, en comparación con la situación actual a cota 76 m.



*Figura 8 Tubos de flujo de 1000 m<sup>3</sup>/s para el escenario E09a a cota 76 m*



*Figura 9 Tubos de flujo de 1000 m<sup>3</sup>/s para el escenario E09b a cota 83 m*

### **Perfiles longitudinales**

Para completar el análisis, se presentan cortes longitudinales del pelo de agua, para caracterizar el remanso producido por la obra para diferentes condiciones hidrológicas y de operación.

El corte se efectuó asociado al brazo principal (figura 10).

Las figuras 11 y 12 presentan los perfiles correspondientes al corte sobre el brazo principal para cotas 76 m y 83 m, respectivamente, para los distintos escenarios hidrológicos. Se observa la disminución significativa de los efectos de remanso al aumentar el nivel de agua: por ejemplo, para el caudal medio de 15.000 m<sup>3</sup>/s, el desnivel del pelo de agua entre Garupá y el vertedero del brazo principal es de aproximadamente 2,7 m a cota 76 m, y cae a 0,70 m cuando se eleva la cota del embalse a 83 m.

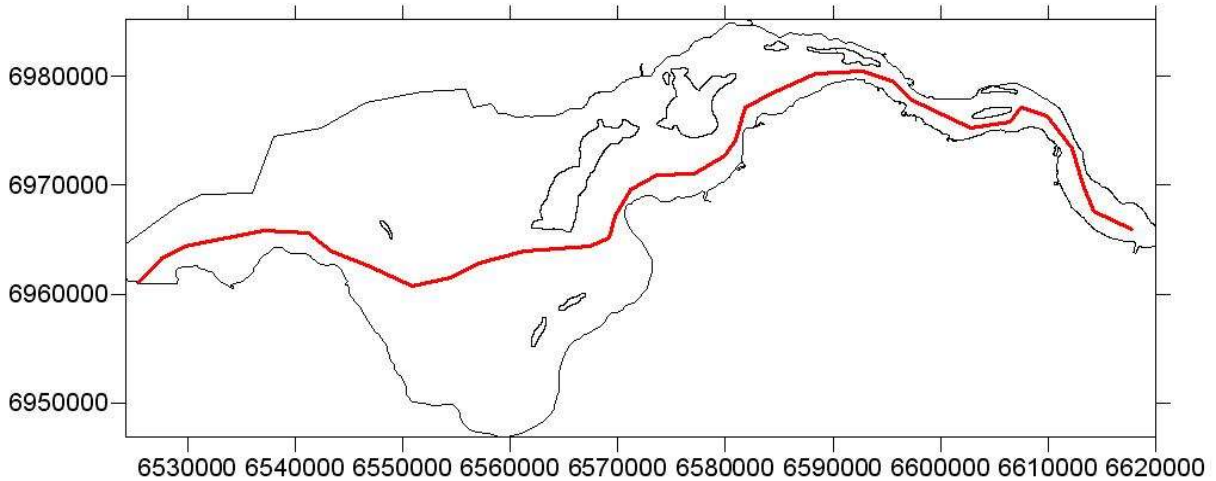


Figura 10 Corte longitudinal, brazo principal

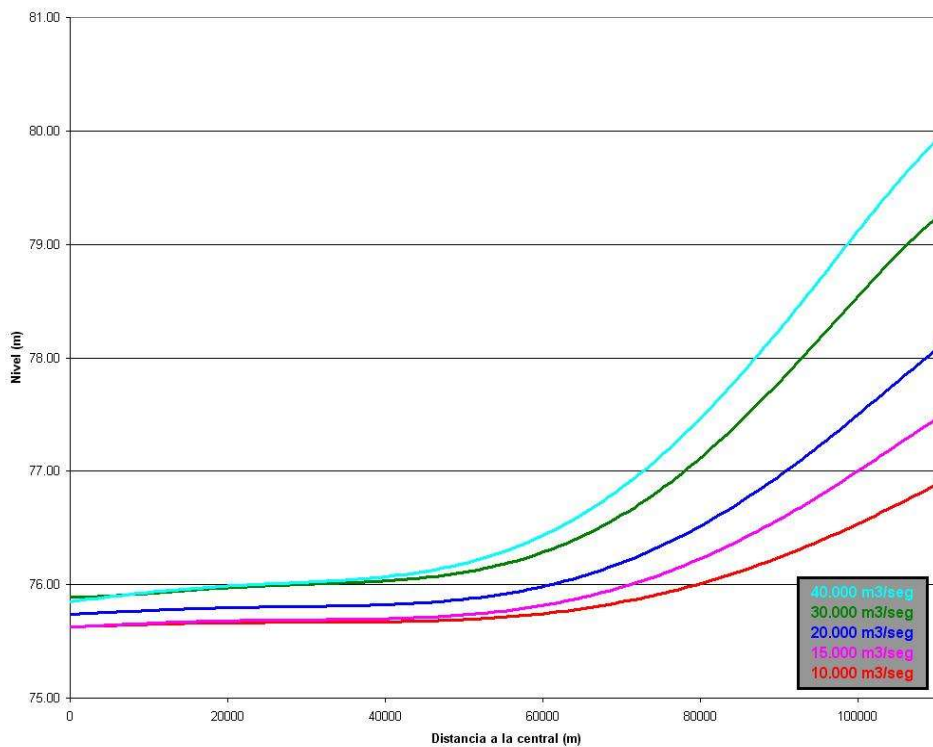
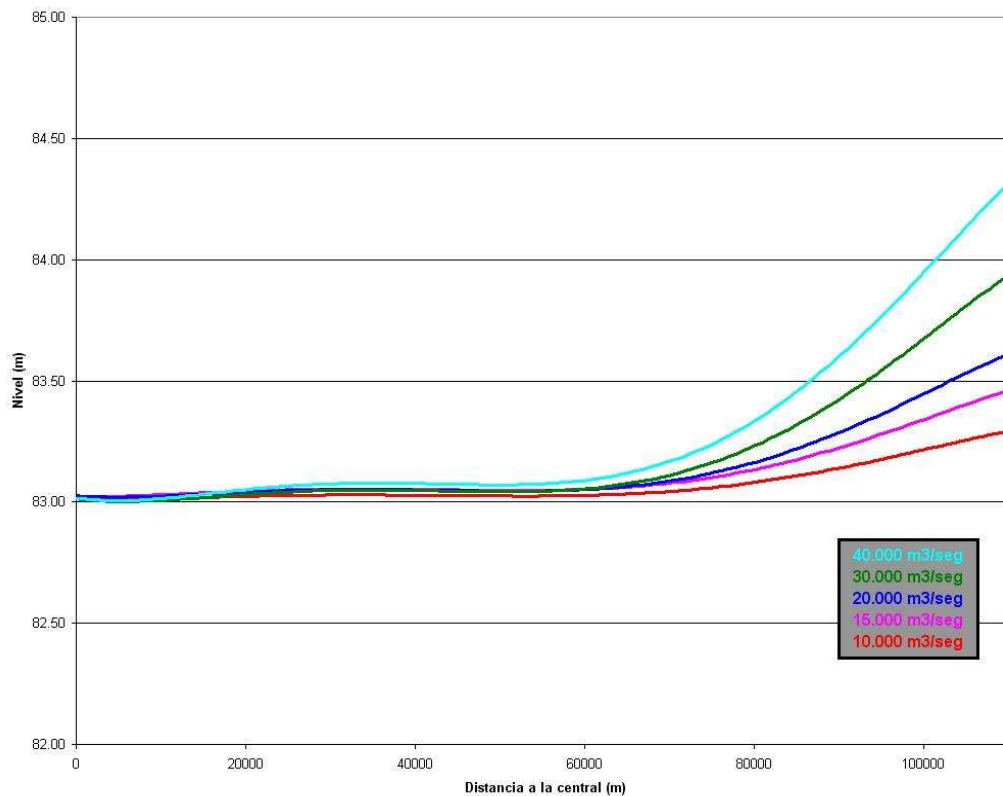


Figura 11 Cortes a cota 76 m, brazo principal



*Figura 12 Cortes a cota 83 m, brazo principal*

### **Tiempos de residencia**

El tiempo de residencia del agua en el embalse es un indicador significativo para analizar la calidad del agua, ya que, dependiendo del tiempo que los contaminantes permanecen dentro del embalse, se pueden llegar a desarrollar o no procesos que alteren esa calidad.

El modelo hidrodinámico es la herramienta adecuada para determinar el tiempo de residencia, ya que puede proveer su distribución espacial para distintas condiciones hidrológicas. De esta manera, pueden detectarse las zonas del embalse más críticas desde el punto de vista de la calidad del agua.

La técnica de cálculo de los tiempos de residencia se basa, simplemente, en medir el tiempo que le toma a una partícula fluida transitar por el embalse, mientras es transportada en forma pasiva por el campo vectorial (discreto) de velocidades que proporciona el modelo hidrodinámico.

Las dos componentes de la velocidad asignadas a la partícula surgen a partir del campo de velocidades calculado con el modelo hidrodinámico, mediante una interpolación bilineal entre los cuatro valores correspondientes a los nodos más cercanos. Multiplicando esas componentes por un paso de tiempo asignado, se obtienen las distancias recorridas en cada dirección, permitiendo ubicar la nueva posición de la partícula, y así sucesivamente hasta que ésta sale del embalse. El paso de tiempo debe ser del orden del tiempo que la partícula tarda en recorrer una celda de la malla de cálculo. Se debe verificar, adicionalmente, que la trayectoria de la partícula sea lo suficientemente suave, es decir, no presente saltos bruscos.

Introduciendo partículas a todo lo ancho del borde de entrada del modelo, se puede cubrir la totalidad del embalse con una adecuada densidad de líneas de corriente, a lo largo de cada una de las cuales se conoce el tiempo acumulado de recorrido. Utilizando esta información, se obtienen curvas de nivel de los tiempos de residencia por técnicas de interpolación.

Se efectuaron determinaciones de la distribución del tiempo de residencia sobre el embalse para todos los escenarios indicados anteriormente, tomando como entrada al embalse el inicio de la zona de transición. Los resultados se presentan en las figuras 13 y 14 para caudal medio a cota 76 m y 83 m.

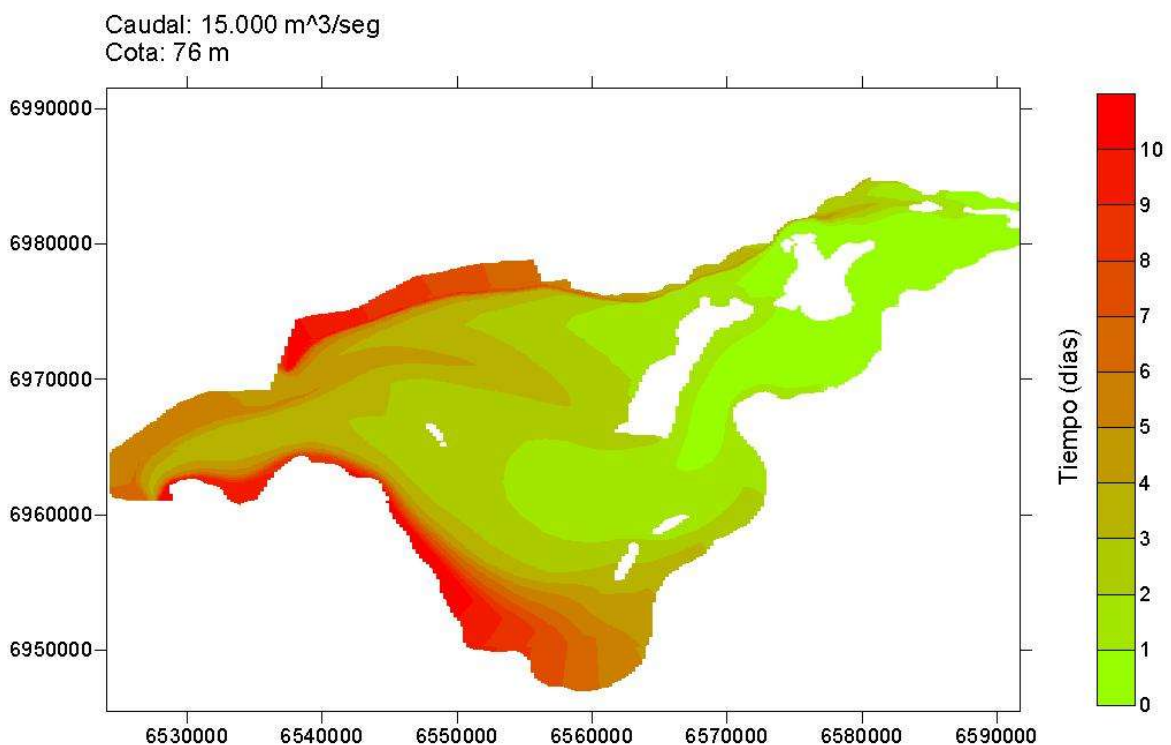


Figura 13 Tiempos de residencia para escenario E07a a cota 76 m

Comparando los resultados obtenidos para distintos caudales, todos correspondientes a cota 76 m, se observó cómo disminuye el tiempo de residencia a medida que aumenta el caudal. Nótese que las zonas más críticas son las costeras, debido obviamente a que la velocidad de la corriente es menor. El máximo tiempo de residencia es similar para ambas márgenes, pero la extensión de la zona más crítica es mayor sobre la margen argentina.

Los resultados para cota 83 m (figura 14) muestran una tendencia similar, pero con tiempos de residencia mucho mayores para esta situación, debido a la disminución de las velocidades de corriente. El aumento del tiempo de residencia es del orden del 100% al pasar de cota 76 m a cota 83 m. Por ejemplo, en el centro del embalse se observa que, para un caudal de 10.000 m<sup>3</sup>/s, una partícula tarda 6 días para salir del embalse a cota 76 m, mientras que ese tiempo aumenta a 12 días a cota 83 m. Esta proporción también se mantiene para un caudal de

40.000 m<sup>3</sup>/s, donde el tiempo de residencia para el centro del embalse es de 2 días a cota 76 m, y aumenta a 4 días a cota 83 m.

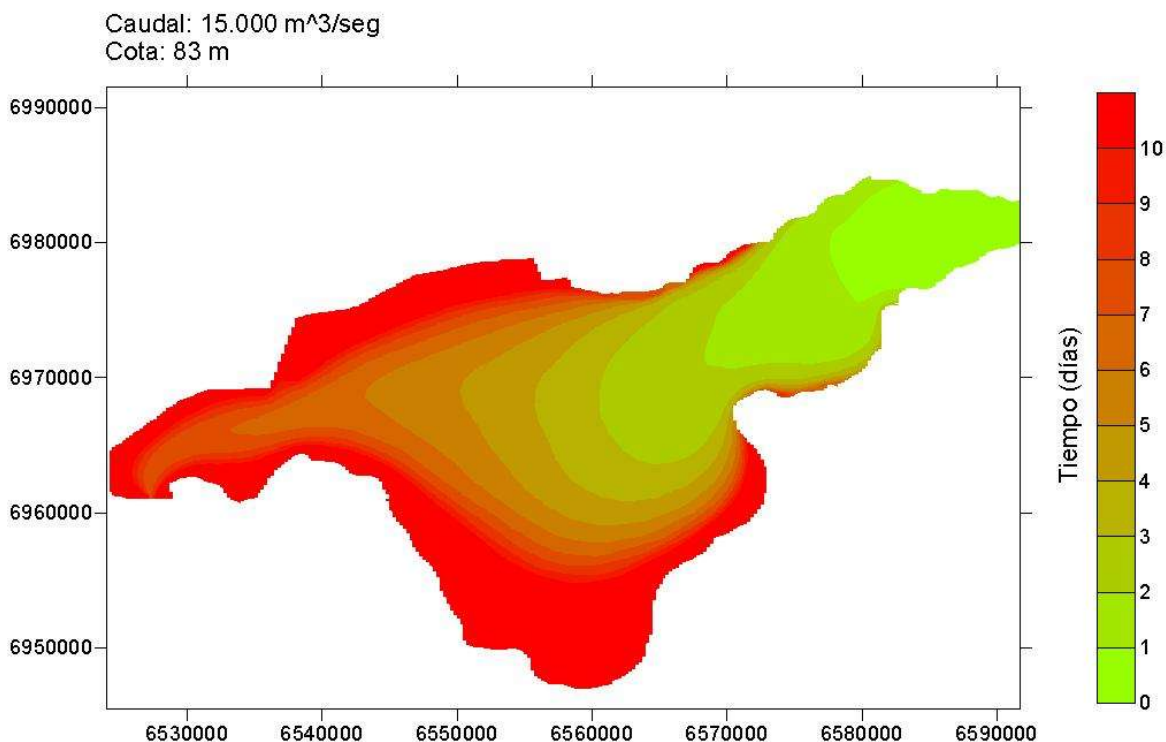


Figura 14 Tiempos de residencia para escenario E07b a cota 83 m

## IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

### Técnica de simulación y software

El modelo de transporte de sólidos suspendidos está basado en el software Manchas (Menéndez, 1986), el cual es apto para modelar la dispersión de contaminantes en una región localizada de aguas poco profundas, en base a una técnica lagrangeana de seguimiento de manchas. Las manchas son distribuciones bidimensionales de tipo gaussiano, que representan la concentración del contaminante. Durante su avance, advectadas por la corriente, las manchas sufren rotaciones y deformaciones debido a los gradientes de velocidades, difusión debido a la turbulencia, y decaimiento debido a la sedimentación. La sedimentación depende del tamaño medio de las partículas, que determinan su velocidad de caída. De la superposición de todas las manchas surge la distribución espacial de concentración.

### **Dominio del modelo**

Las manchas se transportan dentro del dominio del modelo hidrodinámico global del embalse de Yacyretá *EBY-INA I*, que se extiende entre la sección Garupá-Candelaria y la presa.

Ahora bien, dado que en los ensayos preliminares se verificó que a cota actual prácticamente no existe sedimentación en la parte fluvial del embalse, la inyección de sólidos suspendidos se realizó al comienzo de la zona de transición, donde se produce el primer ensanchamiento del embalse. De esta manera no sólo se redujeron los tiempos de cómputo, sino que se dispuso de mayor control para distribuir adecuadamente las manchas representativas de la distribución lateral de concentración de sólidos suspendidos de modo de cubrir todo el embalse.

### **Datos de base**

La EBY proveyó la base de datos de sólidos en suspensión en formato de planilla electrónica, dando la fecha de la medición, el nombre de la estación y la concentración de sólidos en suspensión en unidades de miligramos por litro (mg/l). En la figura 15 se observa la ubicación de las estaciones de medición y su denominación, en las cuales se efectúan, además, mediciones de los otros parámetros de calidad del agua.

Como criterio de calibración del modelo de transporte de sólidos suspendidos se impondrá que éste satisfaga el balance global de masa de sólidos suspendidos, es decir que, impuesto el caudal sólido en la entrada del modelo de acuerdo a los registros, el caudal sólido a la salida sea similar al registrado. En consecuencia, es necesario calcular esos caudales sólidos a partir de los datos disponibles en las estaciones de entrada y de salida.

Las siguientes estaciones se seleccionaron como representativas de las condiciones de transporte de sólidos a la entrada y en las salidas del dominio de modelación:

- Estaciones EI-1 MD, EI-1 C y EI-1 MI para la entrada del modelo en Garupá-Candelaria.
- Estaciones EI10 MI y EI 11 para la salida del modelo por el brazo principal (Central y Vertedero).

Estaciones EI 10 MD y EI 12 para la salida del modelo por el vertedero del brazo Aña-Cuá.



Figura 15 Estaciones de monitoreo de calidad de agua

### Caudales sólidos

Los datos de concentración de sólidos suspendidos se combinaron con los registros de caudal líquido para determinar los caudales sólidos entrantes y salientes del dominio del modelo. Para llevar a cabo esta combinación fue necesario, primero, adoptar algunos criterios de selección y compatibilización de datos:

- Para la entrada del modelo en garupá-candelaria se tomó el promedio de las tres estaciones (EI-1 MI, EI-1 C, y EI-1 MD - Candelaria), cuando éstos existían (o el promedio de dos de ellas, si una faltaba), ya que las mediciones correspondían al mismo día.
- Como ventana de tiempo de trabajo se tomó desde el 23/03/98 al 24/10/02, lo que significó descartar datos de la entrada en Garupá-Candelaria.
- Para la salida del modelo sobre el brazo principal se tomó como serie de datos los que corresponden a la estación EI 11 – vertedero principal, por ser más extendidos en el tiempo y, además, no presentar gran disparidad en el intervalo de tiempo en que hay superposición con la estación EI 10 MI – Sta. María.
- Análogamente, para la salida del modelo sobre el brazo Aña-Cuá se tomó como serie de datos los correspondientes a la estación EI 12 – vertedero Aña-Cuá, por ser más extendidos en el tiempo y, además, no presentar gran disparidad en el intervalo de tiempo en que hay superposición con la estación EI 10 MD – Sto. Tomás.

Las concentraciones representativas en la entrada y las dos salidas del modelo fueron multiplicadas por los caudales líquidos correspondientes a las respectivas fechas de muestreo para obtener los caudales sólidos.

Se analizó que correlación existente entre los caudales sólido y líquido ingresantes al modelo, dicha correlación es pobre, lo cual era de esperarse, ya que los factores determinantes de uno y otro no son los mismos. En efecto, mientras el caudal líquido está básicamente condicionado por las precipitaciones en la parte superior de la cuenca del alto Paraná, el caudal sólido lo está por las lluvias regionales que producen una contribución directa desde la cuenca de aporte, ya que los sólidos provenientes de la parte alta de la cuenca quedan retenidos en la cadena de embalses brasileña. La correlación entre ambos sistemas de precipitación sólo puede esperarse para situaciones de tormentas extendidas espacialmente, seguramente asociadas a los mayores caudales líquidos. En consecuencia, cuando se deban construir escenarios de ensayo para el modelo de transporte de sólidos suspendidos, ambas series deben construirse por separado, aunque preservando una modulación similar.

### **Aporte marginal**

Para la estimación del aporte marginal de sedimentos, aguas abajo de la sección Garupá – Candelaria, se utilizaron los resultados obtenidos en el estudio de sedimentación en el embalse (NHC & EVARSA, 2002). Ahora bien, el tamaño de la cuenca de aporte al embalse de Yacyretá, aguas abajo de esa sección, se ha estimado en 3.500 km<sup>2</sup> sobre territorio paraguayo (margen derecha) y 2.400 km<sup>2</sup> sobre territorio argentino (margen izquierda), es decir 5.900 km<sup>2</sup> en total, lo que equivale a alrededor de un 8,5% de la cuenca total aguas abajo de la presa de Itaipú (69.230 km<sup>2</sup>). En consecuencia, las estimaciones efectuadas en el citado estudio, de acuerdo a distintos métodos de cálculo de tasas de exportación, fueron multiplicadas por el factor 0,1. Los resultados se muestran en la tabla 4, junto con las correspondientes tasas de exportación.

*Tabla 4 Aporte marginal de sólidos al embalse de Yacyretá*

<b>Método</b>	<b>Tasa de Erosión Específica [ton/km<sup>2</sup>/año]</b>	<b>Erosión Total [ton/año]</b>
Fournier	300	1.770.000
Walling y Webb	75	442.500
Fleming y Kadhimi	57	336.300
Varoni	200	1.180.000

En el informe de sedimentación de NHC & EVARSA (2002) se recomienda, por consistencia, un valor algo inferior al provisto por Fournier, que es el máximo, lo que en este caso equivale a tomar como aporte marginal total 1.400.000 ton/año, lo que equivale a aproximadamente 44,4 kg/s.

Si bien este aporte es de un orden de magnitud similar al transportado por el río, su ingreso es gradual y permanece confinado en una franja marginal debido a la acción hidrodinámica de las corrientes. Más aún, una parte significativa sedimenta a poco de ingresar al cuerpo de agua, debido a la brusca expansión.

Para modelar el aporte marginal, éste se dividió según lo que le corresponde a cada margen. Para cada margen se discriminó entre una parte que ingresa estrictamente por la margen del dominio del modelo de sólidos, a la que se designó “Marginal”; y otra parte que lo hace

aguas arriba del dominio del modelo de sólidos (zona de no sedimentación), que fue cargada a la sección de ingreso del modelo, a la que se denominó “Cauce” (ver tabla 5).

*Tabla 5 Distribución del aporte marginal de sólidos al embalse de Yacyretá*

<b>Margen</b>	<b>Total [kg/s]</b>	<b>Cauce [kg/s]</b>	<b>Marginal [kg/s]</b>
Argentina	18,1	14,3	3,78
Paraguay	26,3	7,19	19,1
<b>Total</b>	<b>44,4</b>	<b>21,5</b>	<b>22,9</b>

### **Análisis de tendencias**

No parece adecuado calibrar el modelo sedimentológico a partir de la utilización directa de las series registradas, ya que los caudales sólidos y líquido muestran oscilaciones relativamente intensas y cortas a lo largo del período de registro. Se planteó, entonces, una estrategia de filtrado. Para ello, en primer lugar se completaron los datos faltantes de caudales sólidos mediante un ajuste manual criterioso basado en la representación de los picos más significativos, cuya ocurrencia también debería estar reflejada en el caudal, de acuerdo a lo discutido más arriba. En segundo lugar, se solucionó la falta de simultaneidad de los datos mediante un remuestreo de las series con paso mensual, utilizando polinomios de Hermite. Estas constituyen el punto de partida del filtrado.

El filtrado se llevó a cabo mediante la técnica de Análisis Espectral Singular (Broomhead and King, 1986a,1986b; Vautard and Ghil, 1989; Vautard et al., 1992), o SSA por sus siglas en inglés, que es una variante del método de las componentes principales (PCA). Se utilizó el “SSA-MTM Toolkit” (Myles Allen et al., 2002). Con el SSA se puede realizar la descomposición de series temporales en tendencias, oscilaciones cuasi-periódicas y periódicas, otras componentes significativas, y ruido. Con ellas se pueden reconstruir las contribuciones de las componentes seleccionadas de la serie temporal, y estimar las propiedades espectrales de la serie temporal o de cualquiera de sus componentes por métodos espectrales modernos. En general, las características principales de la señal se pueden reconstruir con muy pocas componentes. La tendencia es la reconstrucción con las componentes de más baja frecuencia.

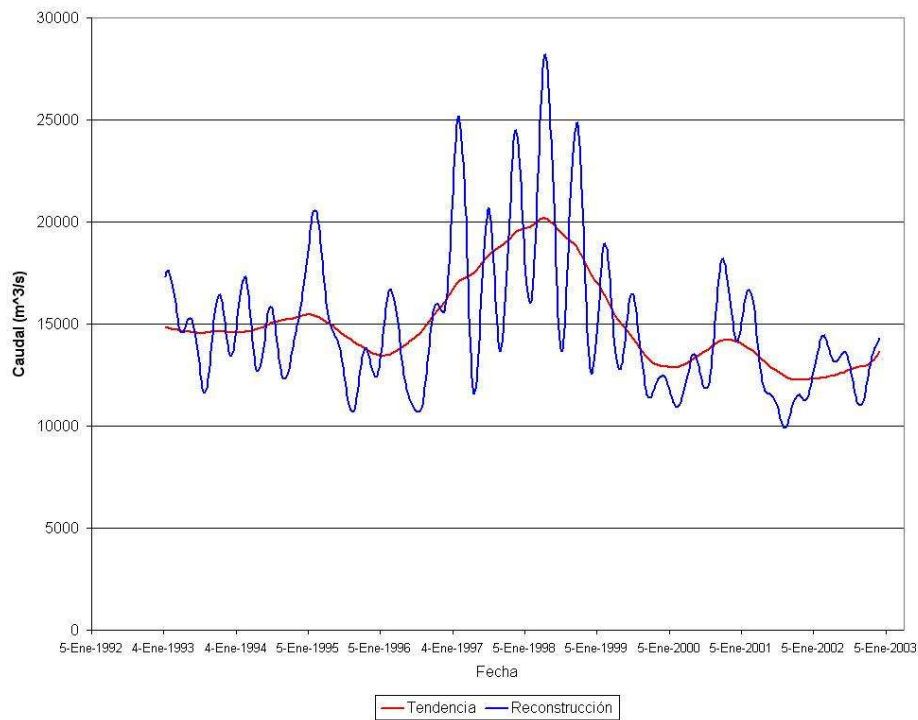


Figura 16 Tendencia y reconstrucción con cinco componentes del caudal líquido entrante

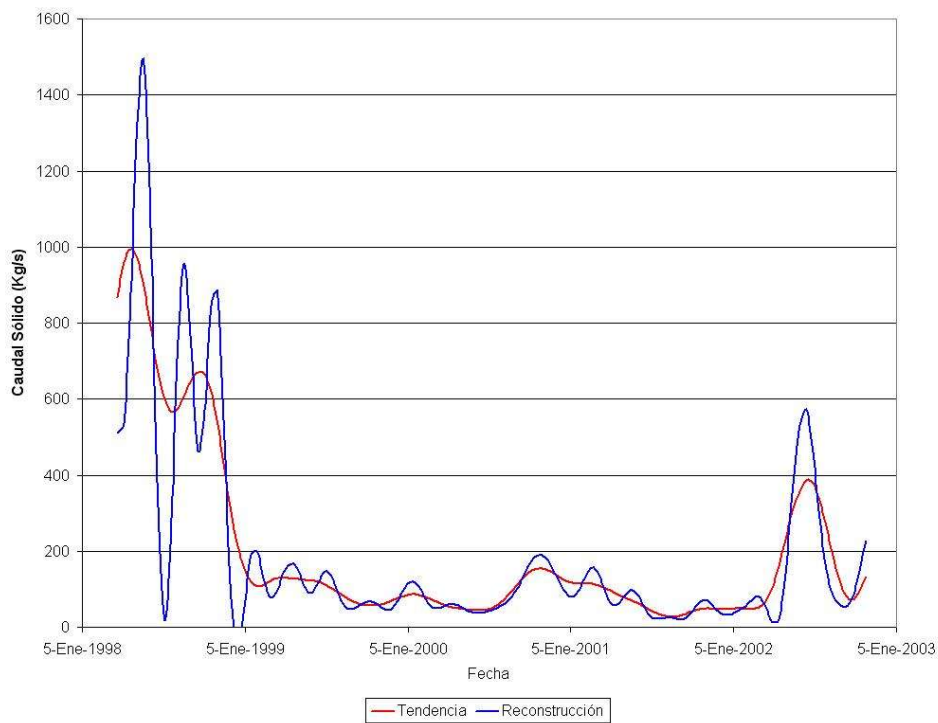


Figura 17 Tendencia y reconstrucción con cinco componentes del caudal sólido entrante

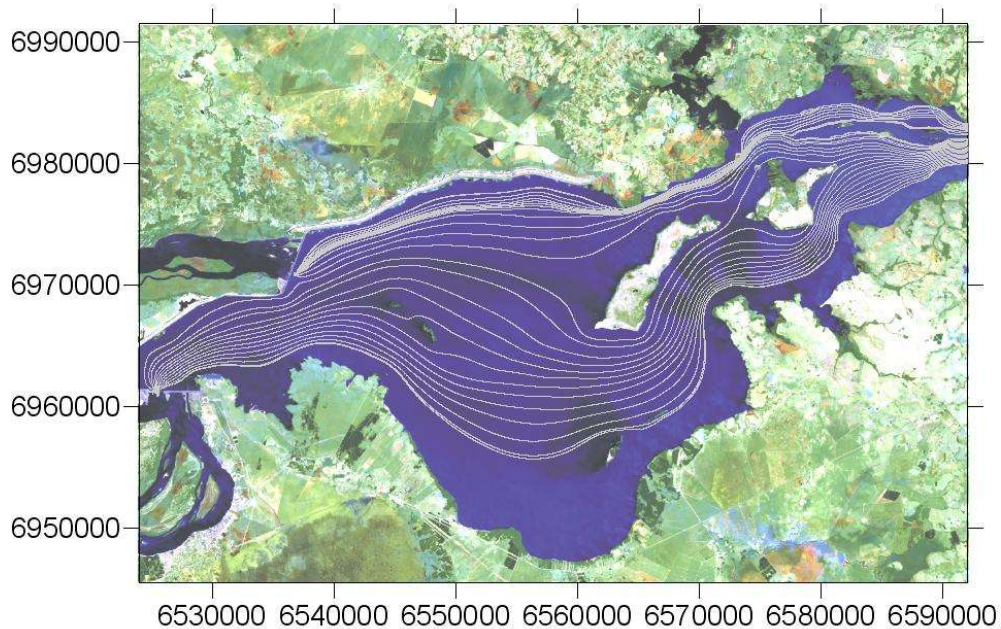
En la figura 16 se muestran la tendencia y la señal reconstruida con cinco componentes para el caudal líquido ingresante. Análogamente, la figura 17 presenta los resultados para el caudal sólido ingresante. Nótese que la oscilación de mayor frecuencia de las tendencias tiene un

período anual, por lo que puede ser considerada como representativa de la variación estacional, superpuesta sobre variaciones interanuales.

Se considera que las series de tendencias obtenidas con la técnica de SSA contienen información significativa respecto del balance global de sólidos suspendidos sobre escalas de tiempo estacionales e interanuales. En consecuencia, éstas se utilizan en el próximo capítulo para definir escenarios de calibración.

### **Discretización del transporte**

El transporte espacialmente continuo de sólidos fue discretizado en alrededor de 35 trayectorias de manchas, que proveyeron una cobertura suficiente como para que su superposición constituyera una distribución lo suficientemente continua. En las figuras 18 y 19 se muestran esas trayectorias para el caudal de 15.000 m<sup>3</sup>/s y las cotas de embalse actual y futura.



*Figura 18 Trayectorias de manchas lagrangeanas para cota 76 m*

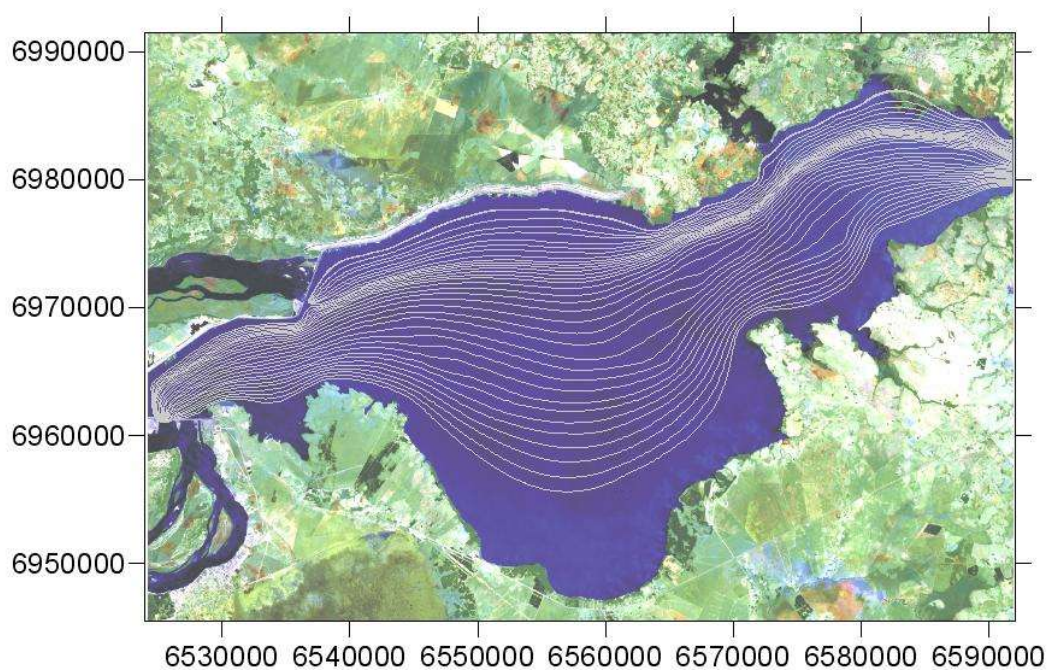


Figura 19 Trayectorias de manchas lagrangeanas para cota 83 m

## CALIBRACIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

### Definición de escenarios

El modelo puede ser calibrado para escenarios estacionarios, dado que la variación temporal considerada, de escala estacional, es lo suficientemente lenta como para que la respuesta del embalse sea cuasi-estacionaria.

Tabla 6 Escenarios de calibración

Escenario	Fecha	Caudal*	Candelaria	Brazo Aña-Cuá	Brazo Principal
E I	24/04/1998	Sólido	994,77	204,72	145,90
		Líquido	20.574	9.774	10.800
E II	21/09/1998	Sólido	671,30	58,25	82,63
		Líquido	19.496	5.100	14.396
E III	04/04/1999	Sólido	130,18	16,55	57,73
		Líquido	15.400	3.300	12.100
E IV	14/01/2000	Sólido	85,99	11,58	53,75
		Líquido	11.711	1.780	9.931
E V	25/10/2000	Sólido	155,44	17,92	45,05
		Líquido	14.200	2.548	11.652
E VI	21/08/2001	Sólido	27,40	2,58	7,50
		Líquido	12.900	1.875	11.025

\*(Caudal sólido en kg/s y caudal líquido en m<sup>3</sup>/s)

Se seleccionaron escenarios de calibración a partir de las series de tendencias de caudales sólidos. Estos se describen en la tabla 6, donde también se indican las tendencias del caudal líquido. Los primeros dos escenarios (E I y E II) corresponden a condiciones aún influenciadas por la gran crecida de 1998, asociada al fenómeno de El Niño. Los restantes son representativos de condiciones más normales. Nótese que se ha cubierto todo el rango de caudales entre 10.000 y 20.000 m<sup>3</sup>/s, que es el rango de variabilidad que muestra la tendencia de caudal.

El caudal sólido entrante se especifica como condición de borde, mientras que los de salida se utilizan como base para calibrar el modelo.

Para la calibración se dispuso de dos parámetros:

- El diámetro medio de las partículas sólidas suspendidas ( $d_{50}$ ) o, más estrictamente, su velocidad de caída, que regula la pérdida por sedimentación en el embalse.
- Un parámetro de distribución que se corresponde con la fracción de caudal sólido total entrante al embalse que enfila hacia el brazo principal.

### **Resultados de la calibración**

En la tabla 7 se presentan los valores de los parámetros con los cuales se calibró el modelo. Entre los caudales sólidos calculados y las tendencias de los registrados, con los dos parámetros utilizados, puede lograrse un acuerdo exacto entre ambos.

*Tabla 7 Diámetros obtenidos en la calibración*

<b>Escenario</b>	<b><math>d_{50}</math> [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>Fracción BP</b>
E I	17,3	0,79
E II	21,0	0,83
E III	7,0	0,39
E IV	3,2	0,17
E V	7,5	0,59
E VI	7,1	0,63

Ahora bien, para poder explotar el modelo para otros escenarios, es necesario disponer de leyes que permitan determinar los dos parámetros de calibración correspondientes. En la figura 20 se representa el diámetro medio en función del caudal líquido para todos los escenarios de calibración. Allí también se muestra una curva de regresión que utiliza como función de base a la exponencial, y que está dada por:

$$d_{50} [\mu\text{m}] = 0,5172 \cdot e^{0,0001796 Q \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]} \quad (4)$$

donde el caudal se ingresa en m<sup>3</sup>/s y el  $d_{50}$  se obtiene en micrones. La correlación para el ajuste efectuado es igual a 0,88, que se considera aceptable en función de la incertidumbre en los datos de entrada.

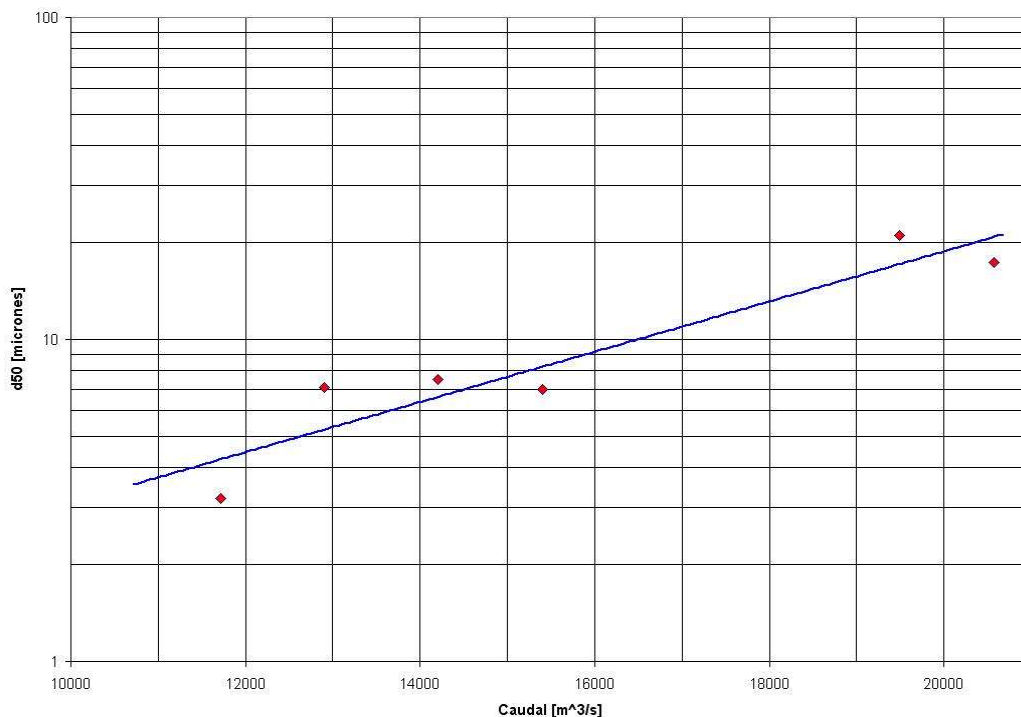


Figura 20 Ajuste caudal- $d_{50}$

El segundo parámetro de calibración, la fracción de masa que le corresponde al brazo principal, también varía con el caudal debido a que el corredor de flujo correspondiente al brazo principal varía con la relación de caudales salientes y con la intensidad de los caudales entrantes. Este parámetro tiene un menor grado de correlación con el caudal que el anterior. Esto es esperable dado que el caudal de salida del brazo Aña-Cuá está regulado, de modo que existe una significativa componente antrópica. De todos modos, para cerrar el modelo se ha ajustado una parábola de segundo grado:

$$FBP = 4 \cdot 10^{-9} \cdot Q^2 - 2 \cdot 10^{-4} \cdot Q + 2,2529 \quad (5)$$

cuyo coeficiente de correlación es  $r^2 = 0,63$ .

En la figura 21 y en la tabla 8 se presentan los caudales sólidos de salida obtenidos con el modelo para los escenarios de calibración, si se utiliza el valor de diámetro y coeficiente de distribución obtenidos de las leyes propuestas. Los resultados se consideran satisfactorios.

Tabla 8 Resultados de la Calibración

Fecha	Caudal Sólido [kg/s]			
	Entrada	BAC	BP	Salida
24/Abr/1998	994,77	149,02	145,89	345,17
25/Oct/2000	155,44	24,94	45,05	63,95
14/Ene/2000	85,99	5,46	53,75	65,62
04/Abr/1999	130,18	14,46	57,73	72,19
21/Ago/2001	27,40	4,75	7,50	9,69
21/Sep/1998	671,30	87,08	82,63	136,64

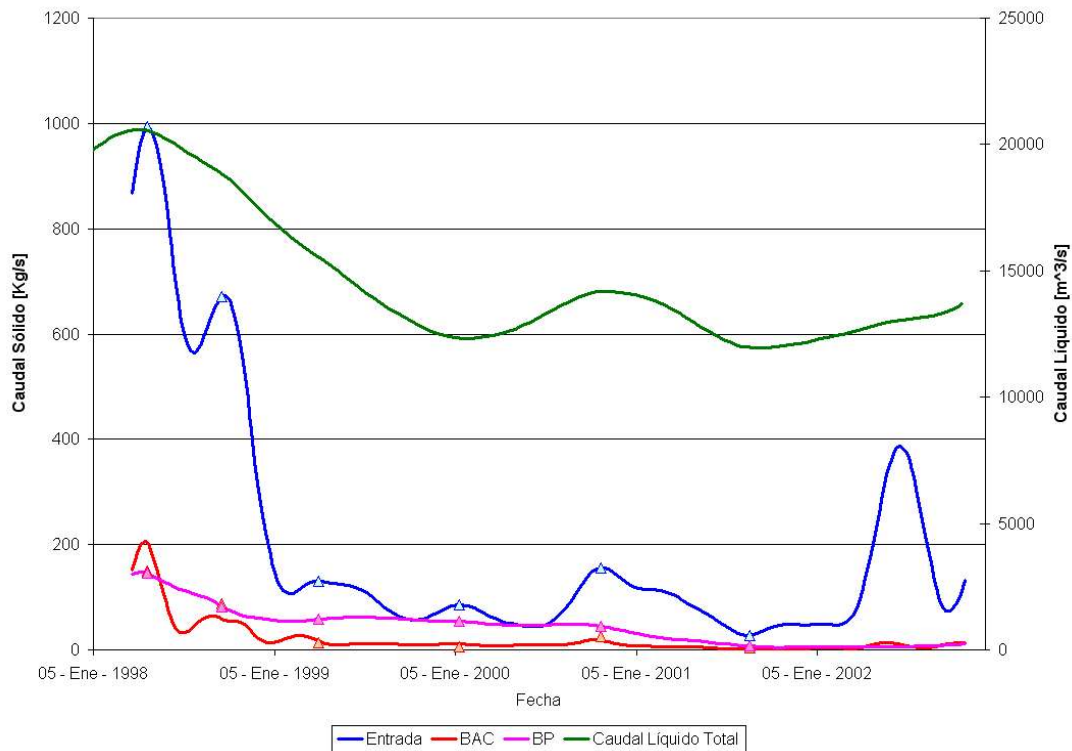


Figura 21 Resultados utilizando datos del ajuste

## EXPLOTACIÓN DEL MODELO DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

### Productos

Con el modelo calibrado, es posible proceder a su explotación para obtener información sobre la dinámica del transporte de sólidos.

En lo que sigue se presentan y analizan los mapas de distribución de concentración y de tasas de sedimentación para condiciones actuales y para cota futura.

### Distribución de concentración

Se eligieron como escenarios de ensayo a EIV, EIII, y EI, que corresponden aproximadamente a los caudales representativos del rango de variabilidad: 10.000 (caudal bajo), 15.000 (caudal medio), y 20.000 m<sup>3</sup>/s (caudal alto).

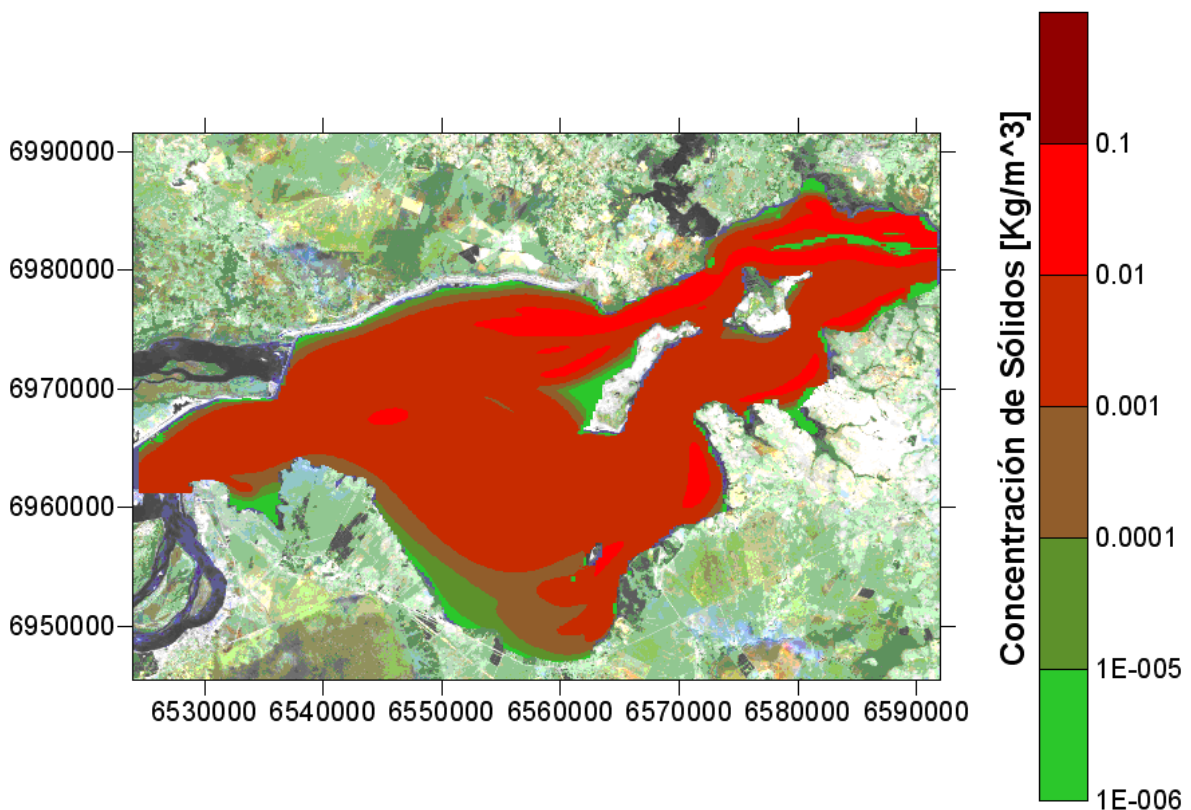


Figura 22 Concentración de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal medio

En el caso del escenario de caudal bajo se observa una distribución en planta relativamente homogénea de la concentración de sólidos en suspensión. En el caso del escenario de caudal medio (figura 22), la concentración de sólidos en suspensión cae en la zona sur del embalse, manteniéndose en el mismo orden de valores para el resto del embalse. En el escenario de mayor caudal se identifican dos canales preferenciales por los que circulan los sólidos en suspensión, los que coinciden con los viejos cauces del río Paraná, notándose entonces la disminución de la capacidad relativa de mezcla lateral debido al aumento de las velocidades de la corriente.

### **Tasas de sedimentación**

En el caso del escenario de caudal bajo se observa que las zonas de mayor sedimentación coinciden con la expansión del cauce y con la parte central del embalse, quedando la zona del antiguo cauce en el embalse con poca sedimentación. Para el escenario de caudal medio (figura 23) se repiten las características apuntadas para el caso de caudal bajo, pero con un aumento en extensión e intensidad en las zonas de sedimentación. En el escenario de mayor caudal la mayor sedimentación se produce en la zona media del embalse y al final del mismo, en la zona de los vertederos, con tasas de sedimentación en general más intensas.

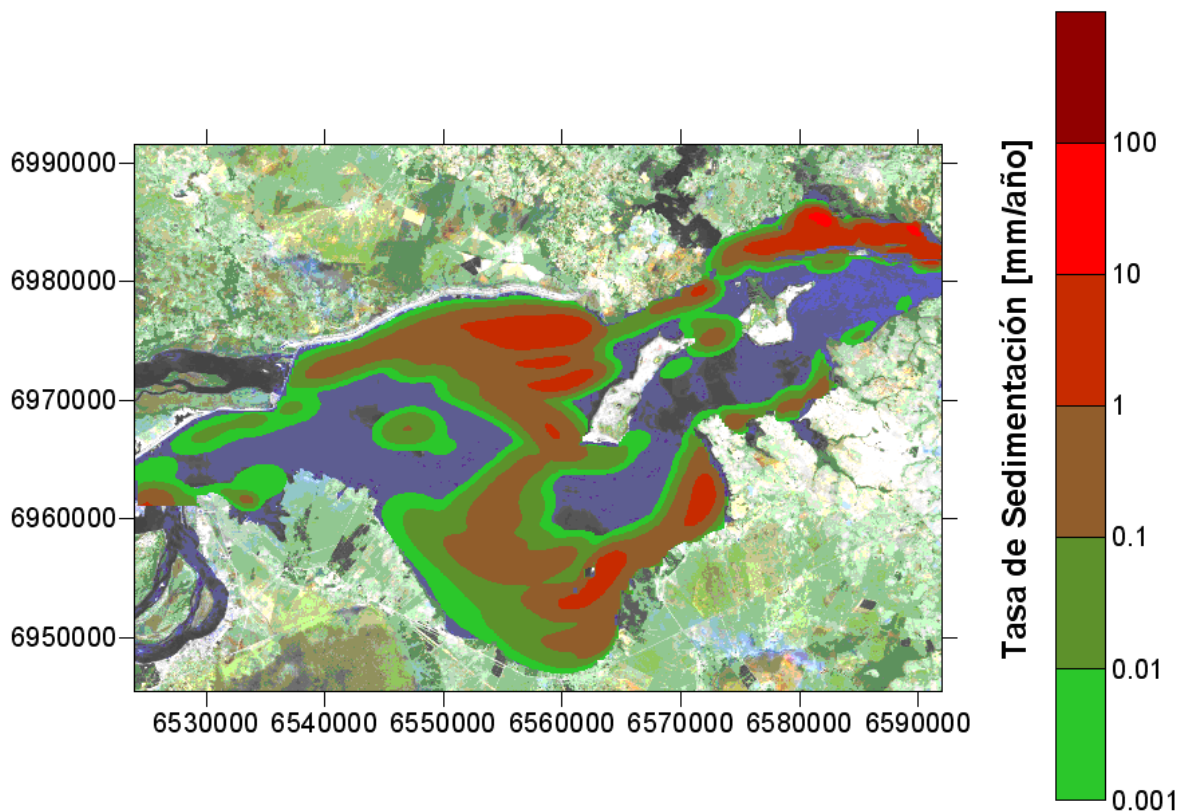
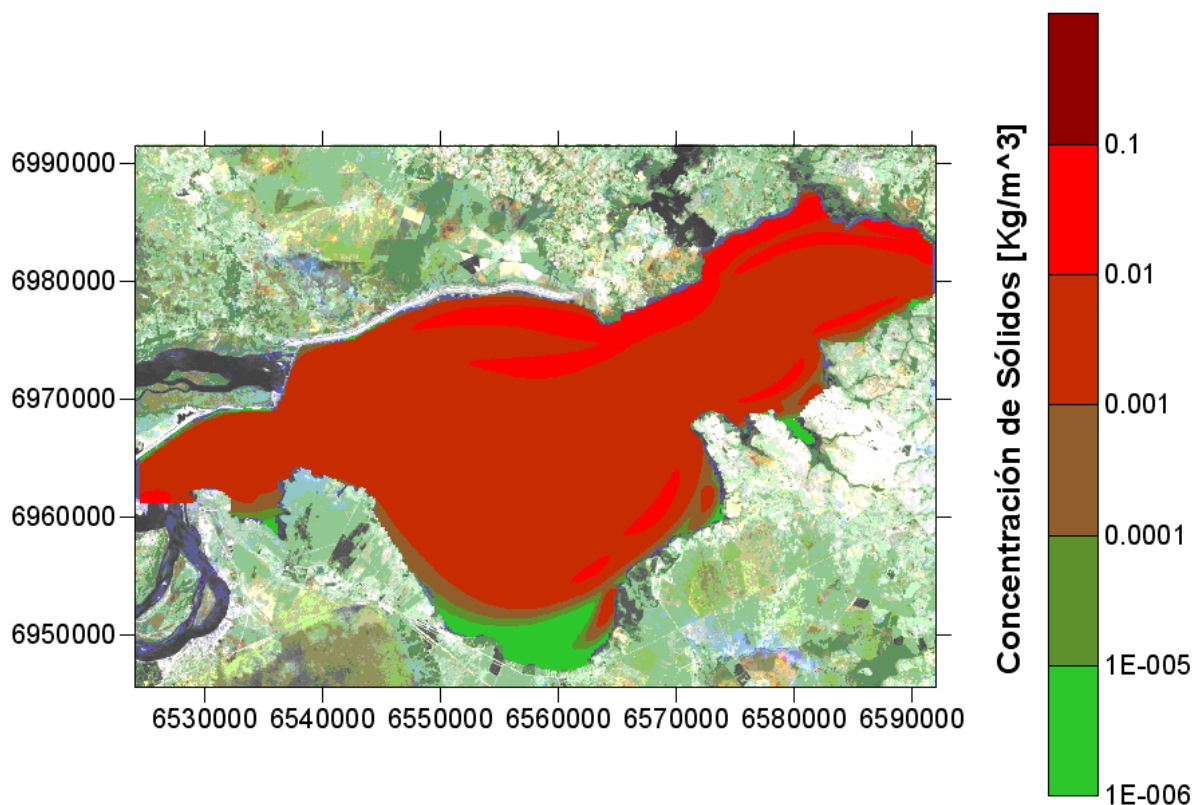


Figura 23 Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal medio

### **Distribución de concentración a cota futura**

Se eligieron los mismos escenarios que en el caso de cota 76 m.

En el caso del escenario de caudal bajo también se observa una buena distribución en planta de la concentración de sólidos en suspensión, como sucede en cota 76 m. Para el escenario de caudal medio (figura 24) no se observan cambios importantes en la concentración de sólidos en suspensión, es decir que la zona sur del embalse disminuye muy poco la concentración y se mantiene en el mismo orden que el resto del embalse. En el escenario de mayor caudal disminuye bastante el poder de mezcla lateral de la corriente, y se forman dos canales preferenciales para la circulación de sólidos, al norte el que se correspondería con el antiguo cauce del brazo Aña-Cuá y al sur el que se correspondería con el canal de los Jesuitas, quedando relegada la zona sur del embalse.



*Figura 24 Concentración de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal medio*

### **Tasas de sedimentación a cota futura**

En el caso del escenario de caudal bajo se observa que la tasa de sedimentación se encuentra entre 0,1 y 1 mm/año en forma bastante uniforme sobre el embalse, con una pequeña zona sin sedimentación aguas arriba en forma de lengua. Para el escenario de caudal medio (figura 25) la tasa de sedimentación también se encuentra entre 0,1 y 1 mm/año, con una lengua de tasa cero que avanza aguas abajo desde la zona de transición, por el centro del embalse. En el escenario de mayor caudal la mayor sedimentación se produce en la zona central del embalse, con tasas de sedimentación del orden de 10 mm/año. En este caso la lengua de tasa cero se desarrolla formando un canal desde aguas arriba hasta el centro del embalse.

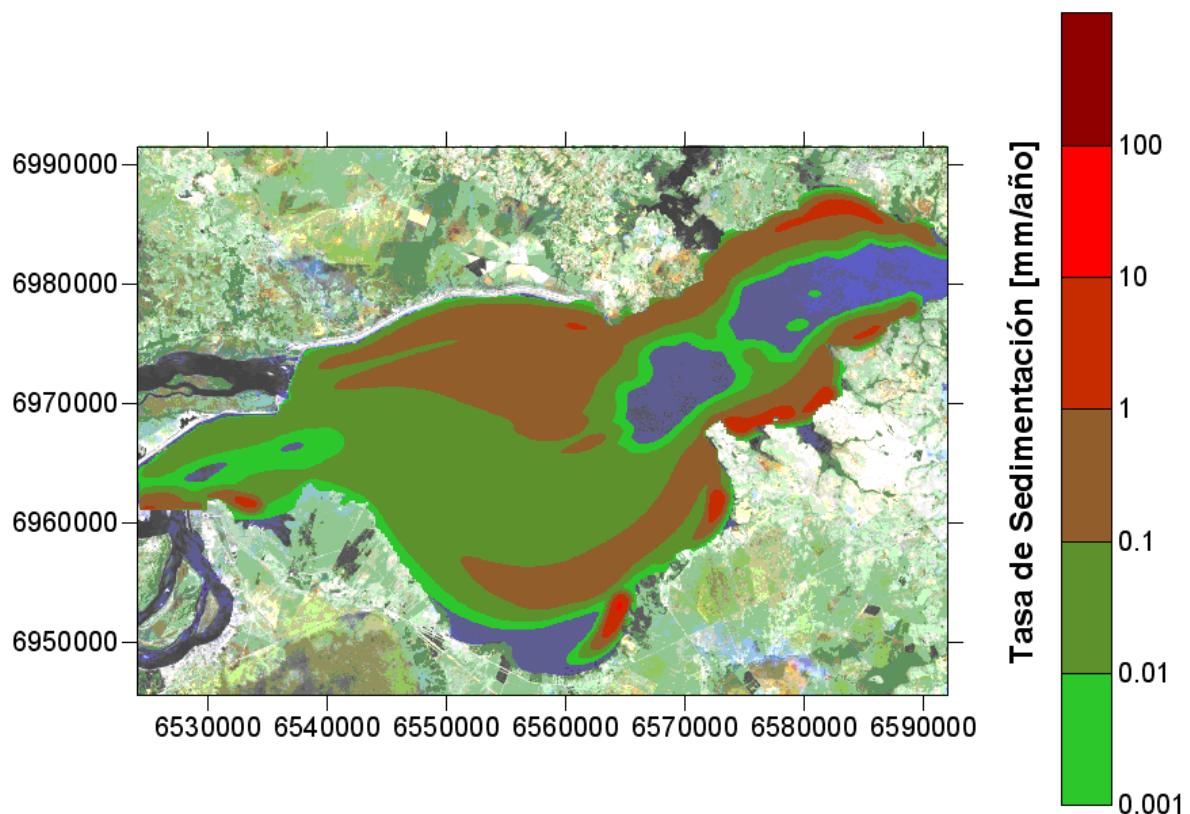


Figura 25 Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal medio

### **Comparación con relevamientos**

En la figura 26 se muestra una zonificación del embalse de Yacyretá efectuada en base a datos granulométricos de muestras de sedimentos de fondo provistos por la EBY, que están agrupados en cuatro rangos. Como figura 27 se repite la distribución de tasas de sedimentación de sólidos suspendidos correspondiente al caudal medio (15.000 m<sup>3</sup>/s), presentada anteriormente como figura 23. En líneas generales se observa que existe coherencia entre ambos resultados. En efecto:

- La zona no incluida en el modelo de transporte de sólidos suspendidos muestra sólo rangos de material grueso (figura 27), indicando precisamente la ausencia de sedimentación apreciable de sólidos suspendidos (material fino).
- La lengua de material grueso que penetra en el embalse (figura 26) se corresponde bien con la zona de ausencia de sedimentación de sólidos suspendidos (figura 27), que además constituye la traza del antiguo cauce principal del río.
- Las zonas con mayor sedimentación (figura 27) se corresponden con las de rangos de material fino (figura 26).

La zona de material grueso cercana a la salida por el brazo principal (figura 26) tiene su correlato en una zona de ausencia de sedimentación (figura 27).



Figura 26 Distribución granulométrica de sedimentos en planta según mediciones

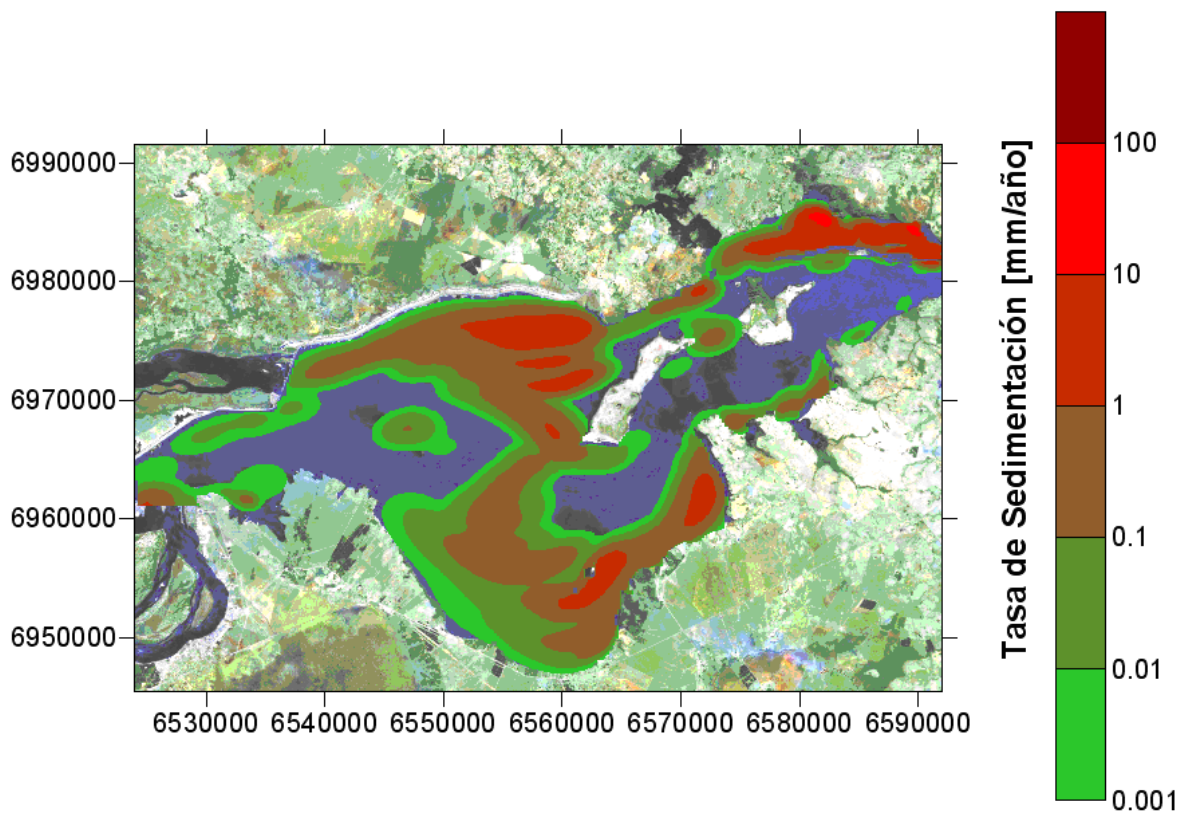


Figura 27 Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión EIII (caudal medio)

## CONCLUSIONES

Como producto del estudio, se dispone de un modelo bidimensional de corrientes del embalse de Yacyretá, que se denominará EBY-INA I, capaz de simular con una precisión adecuada tanto la distribución de niveles como la de velocidades en el embalse.

Los resultados del modelo muestran que la elevación del nivel del embalse desde cota 76 m a 83 m habrá de causar, de acuerdo a lo esperado, variaciones significativas en la dinámica del sistema. En primer lugar, habrá un cambio cuantitativo: la disminución de las velocidades de corriente y del gradiente hidráulico. El cambio cualitativo más importante será la definición de un corredor de flujo central, en lugar de los dos corredores de flujo, asociados a los originales brazos del río Paraná, que se distinguen actualmente. Esto habrá de tener consecuencias importantes en el transporte de sedimentos y contaminantes.

Otras conclusiones importantes que surgen de la modelación hidrodinámica son:

- La información batimétrica es un dato muy relevante para predecir adecuadamente la hidrodinámica del sistema.
- Los mapas de distribución de tiempos de residencia constituyen una herramienta muy valiosa para ser utilizados en el análisis de la calidad del agua del embalse.

El modelo de transporte de sólidos implementado para el embalse de Yacyretá es capaz de reproducir adecuadamente el balance global de sólidos que surge de los monitoreos históricos y, además, reproduce cualitativamente en forma satisfactoria las zonas de deposición de sólidos suspendidos. En consecuencia, se lo considera una herramienta relativamente confiable como para ser utilizada como base para el transporte de contaminantes en fase particulada.

La mezcla lateral es relativamente débil frente a la advección, por lo que para los caudales más altos los sólidos tienden a desplazarse por los corredores principales de flujo. Esto indica, además, que los contaminantes vertidos en una margen se desplazan esencialmente adyacentes a esa margen.

El análisis de series de concentraciones más prolongadas puede llevar a la necesidad de ajustar la calibración del modelo presentado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abbott, M.** (1979) “*Computational Hydraulics*”. Pitman, Boston.
- Álvarez Tagliabue, C.U., Menéndez, A.N.** (2003) “*Modelación hidrodinámica del embalse de Yacyretá*”. Informe INA-LHA 01-224-03.
- Álvarez Tagliabue, C.U., Menéndez, A.N.** (2003) “*El cambio hidrodinámico por la elevación del nivel*”. Informe INA-LHA 02-224-03.
- Álvarez Tagliabue, C.U., Menéndez, A.N.** (2003) “*Modelo Hidrodinámico Global del embalse de Yacyretá*”. Informe INA-LHA 02-225-03.
- Álvarez Tagliabue, C.U.** (2004) “*Modelación de la hidrodinámica y del transporte de sólidos suspendidos en el embalse de Yacyretá*”. Tesis de Ingeniería Civil - FIUBA.
- Broomhead, D.S. and King, G.** (1986) “*Extracting qualitative dynamics from experimental data*”. *Physica D*, 20, 217-236
- Broomhead, D.S., and King, G.** (1986) “*On the qualitative analysis of experimental dynamical systems, in Nonlinear Phenomena and Chaos*”. S. Sarkar (Ed.), Adam Hilger, Bristol, 113-144.
- Menéndez, A.N.** (1985) “*Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre*”. Informe interno LHA-INCYTH-S5-016-85, Ezeiza.
- Menéndez, A.N.** (1986) “*Simulación numérica de la dispersión de contaminantes en regiones localizadas*”. Informe INA-LHA 066-01-86.
- Menéndez, A.N.** (1990) “*Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos*”. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, Vol. 6, 1.
- Morillo, S., Tarela, P.A.** (2002) “*Simulación numérica de la estratificación térmica en el embalse de Yacyretá*”. Informe INA-LHA 1.131 - 002 – 02 para la EBY.
- Myles Allen, Mike Dettinger, Kayo Ide, Dmitri Kondrashov, Michael Ghil, Mike Mann, Andrew W. Robertson, Amira Saunders, Ferenc Varadi, Yudong Tian, and Pascal Yiou** (2002) SSA-MTM Group, UCLA.
- NHC, EVARSA, Gregory L. Morris & Assoc.** (2002) “*Estudios de sedimentación para actualizar la definición de la vida útil del embalse del Complejo Hidroeléctrico Yacyretá*”. Informe para la EBY.
- Vautard, R., and M. Ghil** (1989) “*Singular Spectrum Analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series*”. *Physica D*, vol. 35, pp. 395-424.
- Vautard, R., P. Yiou, and M. Ghil** (1992) “*Singular Spectrum Analysis: A toolkit for short, noisy, chaotic time series*”. *Physica D*, volume 38, pp. 74-95