



**Universidad de Buenos Aires**

# **Facultad de Ingeniería**

**Tesis de Grado en Ingeniería Civil**

## **SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA Y EL TRANSPORTE DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN EL EMBALSE DE YACYRETÁ**

**por**

**Christian Uriel ÁLVAREZ TAGLIABUE**



**Septiembre 2004**

## **Tesis de Grado en Ingeniería Civil**

# **SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA HIDRODINÁMICA Y EL TRANSPORTE DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN EL EMBALSE DE YACYRETÁ**

Tesista:       **Sr. Christian Uriel ÁLVAREZ TAGLIABUE**

Tutor:         **Dr. Ángel Nicolás MENÉNDEZ** (FIUBA – Universidad de Buenos Aires)

Presentada:   **Septiembre 2004**

Tribunal Examinador:

**Dr. Ing. Alfonso PUJOL** (FIUBA – Universidad de Buenos Aires)

**Dr. Pablo Adrián TARELA** (FIUBA – Universidad de Buenos Aires)

**Ing. Mauricio PERAYRE** (EBY – Entidad Binacional Yacyretá)

## AGRADECIMIENTOS

Deseo realizar los siguientes agradecimientos:

A mi familia por el apoyo y la financiación de mi carrera.

A mi tutor de tesis, el Dr. Ángel N. Menéndez, por su guía y tiempo invertido en el desarrollo y corrección de la tesis.

A las autoridades del Instituto Nacional del Agua (INA), y en particular al Ing. Julio C. De Lío, Director del Laboratorio de Hidráulica y del Ambiente (LHA).

A las autoridades de la Entidad Binacional Yacyretá (EBY), y en particular al Ing. Mauricio Perayre, que realizó las gestiones para obtener la autorización de la realización de esta tesis.

A los integrantes del Tribunal Examinador, que aceptaron dedicarle parte de su tiempo a la evaluación de este trabajo.

A mis amigos y compañeros de trabajo.

Christian U. Álvarez Tagliabue  
[calvarez@fi.uba.ar](mailto:calvarez@fi.uba.ar)

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO.....</b>	<b>6</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
1.1 Descripción del problema .....	7
1.2 Descripción del complejo yacyretá .....	8
1.2.1 Ubicación geográfica .....	8
1.2.2 Central y Vertedero del Brazo Principal .....	9
1.2.3 Esclusa de navegación.....	10
1.2.4 Vertedero del brazo Aña-Cuá.....	11
1.2.5 Transferencia de peces .....	12
1.2.6 La presa .....	13
1.2.7 Turbinas y generadores .....	14
1.2.8 Grúas .....	15
1.2.9 Compuertas y ataguías .....	16
1.2.10 Instalaciones eléctricas .....	16
1.3 Breve descripción del río paraná.....	16
1.4 Breve descripción de la cuenca de aporte .....	18
1.5 Antecedentes .....	20
1.5.1 Estudios previos relacionados a yacyretá.....	20
1.5.2 Metodología de estudio .....	21
<b>2 MODELO HIDRODINÁMICO .....</b>	<b>23</b>
2.1 Implementación.....	23
2.1.1 Descripción del modelo matemático y del esquema numérico .....	23
2.1.2 Datos de base .....	25
2.1.3 Generación del modelo numérico del terreno .....	29
2.1.4 Condiciones de borde.....	30
2.2 Calibración.....	33
2.2.1 Definición de escenarios .....	33
2.2.2 Resultados de la calibración.....	36
2.2.3 Validación en régimen impermanente.....	47
2.3 Explotación .....	47
2.3.1 Distribución de velocidades .....	47
2.3.2 Tubos de flujo .....	59
2.3.3 Perfiles longitudinales.....	65
2.3.4 Tiempos de residencia.....	69

<b>3</b>	<b>MODELO DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS .....</b>	<b>75</b>
3.1	Implementación.....	75
3.1.1	Descripción del modelo matemático y del esquema numérico .....	75
3.1.2	Datos de base .....	76
3.1.3	Análisis de tendencias .....	82
3.1.4	discretización del transporte.....	89
3.2	Calibración.....	92
3.2.1	Definición de escenarios .....	92
3.2.2	Resultados de la calibración.....	93
3.3	Explotación .....	97
3.3.1	Distribución de concentración.....	97
3.3.2	Tasas de sedimentación.....	100
3.3.3	Distribución de concentración a cota futura.....	102
3.3.4	Tasas de sedimentación a cota futura .....	104
3.3.5	Consistencia con sedimento de fondo .....	106
3.3.6	Comparación con resultados previos.....	107
<b>4</b>	<b>PRODUCTOS Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>110</b>
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>112</b>

## **PRÓLOGO**

La presente Tesis de Ingeniería Civil forma parte de los requerimientos académicos para la obtención del título de grado que otorga la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, según consta en los planes de estudio vigentes aprobados por el Consejo Superior de la facultad (C.S. N° 1034/90).

Como tutor de esta tesis fue elegido el profesor Dr. Ángel N. Menéndez quien propuso el tema de tesis y plan de estudios individuales, el cual fue remitido a la Comisión Curricular Permanente de Ingeniería Civil, donde fue evaluado y aprobado según consta en la resolución 1827/02 del Decano de la Facultad con fecha 25 de octubre de 2002.

Este trabajo se ha realizado en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica (LHA) del Instituto Nacional del Agua (INA) mediante una financiación mixta entre el INA y la Entidad Binacional Yacyretá (EBY), a través del Convenio Marco firmado entre ambas entidades con fecha 19/Feb/2002.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

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.

En primer lugar debe modelarse la hidrodinámica, ya que las corrientes son el mecanismo primario de transporte en el embalse. Al mismo tiempo, resulta fundamental determinar si se pueden producir estratificaciones térmicas y bajo qué condiciones, ya que ello condiciona significativamente la hidrodinámica y también los procesos de transformación. Luego se debe modelar el transporte de los sólidos suspendidos, ya que ellos son uno de los vehículos primarios de transporte de algunos contaminantes con alta capacidad de adsorción. A continuación deben modelarse las reacciones principales para cada contaminante en particular.

El estudio que conforma la presente tesis forma parte de un proyecto que se viene desarrollando de acuerdo a la línea de análisis recién esbozada, a través de la implementación de modelos numéricos que simulan los procesos descritos. En particular, se utilizan modelos hidrodinámicos, hidrotérmicos y de transporte de sedimentos y contaminantes. Cada uno de estos modelos es sometido primero a un proceso de calibración en base a la información de campo disponible. Luego se explotan para producir resultados que contribuyan a la diagnosis y la prognosis de los fenómenos involucrados.

El objetivo final del proyecto es procesar esos resultados de modo de generar información que resulte de utilidad para el tomador de decisiones estratégicas.

Este programa de estudios ha sido acordado con la Entidad Binacional Yacyretá (EBY), a través del Convenio Marco vigente entre la EBY y el INA.

El alcance de la presente tesis se limita al estudio hidrodinámico y de transporte de sólidos en suspensión en el embalse de Yacyretá, utilizando como herramientas los modelos numéricos que se consideran aptos para la simulación de estos fenómenos. Específicamente, se describen la implementación y calibración de los modelos hidrodinámico y de transporte de sólidos en el embalse, y se analizan y discuten las consecuencias que este nuevo conocimiento agrega tanto en relación a la gestión del embalse como a la implementación de los modelos de transporte de contaminantes.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL COMPLEJO YACYRETÁ

### 1.2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

El aprovechamiento hidroeléctrico se encuentra ubicado sobre un tramo del río Paraná donde el mismo escurre de Este a Oeste (ver figuras 1.2.1 y 1.2.2), al S.E. de la República del Paraguay y N.E. de la República Argentina, situándose las obras de cabecera en Rincón Santa María (R.A.), N.O. de la Isla Yacyretá (R.P.) y tierra firme paraguaya, próxima a la ciudad de Ayolas (Departamento de Misiones, Paraguay) e Ituzaingó (Provincia de Corrientes Argentina.). El complejo dista a 1.470 km de la ciudad de Buenos Aires, medidos sobre la vía navegable.



*Figura 1.2.1 Ubicación regional del embalse de Yacyretá*



Figura 1.2.2 Ubicación local del embalse de Yacyretá

## 1.2.2 CENTRAL Y VERTEDERO DEL BRAZO PRINCIPAL

En la Isla Yacyretá aledaña al Brazo Principal se construyó una Central que cuenta con 20 turbinas acopladas a generadores de electricidad (ver figura 1.2.3), de una potencia instalada total de 3.200 MW, y un vertedero provisto de 18 compuertas radiales. En lo que va del año 2004 se puede decir que la potencia promedio que consume el país es de unos 10.000 MW (CAMMESA), por lo que la central trabajando a plena potencia representaría más del 30% de la demanda actual de energía eléctrica.

El vertedero del Brazo Principal dispone de 18 compuertas radiales operadas con servomotores hidráulicos. Su cresta se construyó en dos etapas para permitir durante el proceso constructivo de la obra el desvío del río a través de sus vanos a cota rebajada, recreciéndose posteriormente hasta alcanzar su cota definitiva.

Aguas abajo del mismo se encuentra la pileta de aquietamiento, que tiene un ancho total de 342 metros y una longitud de 100 metros (incluyendo el umbral final de 6 metros) cuya finalidad es desacelerar la velocidad de las aguas en forma tal de asimilarlas a las condiciones naturales evitando acciones erosivas aguas abajo.



*Figura 1.2.3 Central y vertedero del Brazo Principal*

### 1.2.3 ESCLUSA DE NAVEGACIÓN

Sobre la margen argentina del Brazo Principal se construyó una Esclusa de Navegación (ver figura 1.2.4), ubicada más precisamente en Rincón Santa María. Es una estructura de hormigón que permite salvar el desnivel de 23 metros creado por el embalse, entre su nivel de cabecera y el de restitución del río aguas abajo de la obra. Permite que en un tiempo de esclusado del orden de los 45 minutos, un tren de barcazas pueda trasladarse desde aguas abajo hacia aguas arriba o viceversa.

Consta de un cuenco o recinto de 27 metros de ancho y 270 metros de longitud. El cuenco está compuesto por muros de hormigón que alojan galerías de alimentación y desagüe para operación del sistema, donde compuertas radiales permiten el ingreso, desde aguas arriba, o egreso, hacia aguas abajo, de las aguas que alimentan el cuenco.



*Figura 1.2.4* Esclusa de Navegación

Su extremo de aguas arriba está cerrado por una compuerta plana de rodillos de 9 metros de altura y 30 metros de ancho, que desliza adosada a una pared de hormigón, mientras que aguas abajo se ha emplazado una compuerta de dos hojas, de 30 metros de altura comandadas ambas desde la sala de control, donde opera el tablero del sistema operativo integral y todo el equipo de control y registro correspondiente.

Está alimentada eléctricamente desde la Central mediante una línea aérea de 13,2 kV. La Esclusa de Navegación opera en forma continua en coordinación con la Prefectura Naval Argentina.

#### **1.2.4 VERTEDERO DEL BRAZO AÑA-CUÁ**

En el Brazo Aña-Cuá se construyó otro vertedero dotado de 16 compuertas radiales (ver figura 1.2.5) que, junto con el vertedero Principal, tienen capacidad para verter hasta 95.000 m<sup>3</sup>/s. Por este vertedero se deja escurrir un caudal ecológico fijado en 1.500 m<sup>3</sup>/s. En el futuro se planea realizar una central para turbinar este caudal, y así aprovechar económicamente su energía.

El vertedero del Brazo Aña-Cuá está provisto de 16 compuertas radiales operadas con servomotores hidráulicos y su pileta de aquietamiento tiene un ancho de 90 metros, incluyendo el umbral final.

Sobre las pilas de ambos vertederos, aguas arriba se encuentran los puentes que empalman con los caminos de coronamiento de las presas adyacentes.



*Figura 1.2.5 Vertedero del Brazo Aña-Cuá*

### 1.2.5 TRANSFERENCIA DE PECES

En ambos extremos de la Central operan instalaciones de transferencia de peces, con la misión de permitir la migración de las especies desde el río Paraná hacia el embalse aguas arriba de la presa.

Estas instalaciones operan en forma permanente, con personal en turno y bajo la supervisión de biólogos especializados. La operación está certificada por la norma ISO 9002.

El sistema de transferencia de peces dispone de tomas de captación ubicadas aguas abajo en cada una de sus instalaciones principales. Los peces son atraídos hacia las bocas de captación por una corriente alimentada por un sistema de bombas que provee flujo de agua en los canales de captación, y una vez concentrados y elevados mediante un ascensor (ver figura 1.2.6), son descargados en la superficie del embalse



*Figura 1.2.6 Estructura de transferencia de peces*

## 1.2.6 LA PRESA

Para crear el embalse de Yacyretá se realizó la construcción de una presa de materiales sueltos (arena, arcilla y piedra) de una longitud aproximada de 64,7 km que, junto con las estructuras de hormigón, cierran su perímetro hasta las zonas topográficamente más altas de las márgenes argentina y paraguaya.

La presa de embalse de Yacyretá está compuesta por diferentes estructuras cuyas características, comenzando desde la margen izquierda (Argentina), encontramos en primer lugar la Presa Lateral Izquierda de relativamente baja altura dado que su trazado sigue las zonas más altas del terreno, tanto así que en un tramo de casi 1 km la misma se interrumpe por no ser necesaria.

Con inicio en este promontorio natural alto se desarrolla la denominada Presa Lateral Izquierda que se prolonga hasta la Esclusa de Navegación, a partir de la misma la presa de tierra continúa hasta el vertedero Principal situado en al Isla Yacyretá, en la margen izquierda del Brazo Principal.

Este tramo de la presa de tierra denominado Presa de Cierre del Brazo Principal es el de mayor altura relativa entre el coronamiento de cota constante y la base de fundación, y contiene al caudal del Río Paraná del que fuera su Brazo Principal.

Adyacente al vertedero Principal, se emplaza la Central Hidroeléctrica, gran estructura de hormigón que empalma con otro tramo de presa (la denominada Presa Isla Yacyretá), mediante un cierre transversal de hormigón.

La Presa Isla Yacyretá, forma un ángulo recto cambiando la dirección de este-oeste, a sur- norte, y recorre la isla Yacyretá hasta la margen izquierda del Brazo Aña-Cuá donde se localiza el vertedero homónimo.

A partir del mismo se ubica la Presa de Cierre del Brazo Aña-Cuá, que conecta a este vertedero con la Presa Lateral Derecha, que en trayectoria casi paralela al río por la parte continental paraguaya, finaliza su recorrido en las proximidades de la localidad de San Cosme y Damián, empalmando con una elevación suave del terreno natural. Esta Presa intercepta los drenajes pluviales provenientes de costa firme paraguaya que desembocan en el Brazo Aña-Cuá. Para reencauzarlos, paralelo a la presa se ha construido un canal lateral de unos 36 km de longitud, que los descarga aguas abajo del vertedero Aña-Cuá.

Las presas de materiales sueltos varían en su sección transversal y en su altura de acuerdo con la topografía del terreno y con las condiciones de fundación. Tiene una altura máxima de 43 metros, el ancho en la base es mucho mayor que la altura (del orden de cinco a seis veces) lo que le confiere un alto grado de estabilidad.

A lo largo de los 64,7 km su diseño se adecuó a las condiciones de cada lugar, priorizando la disponibilidad y proximidad de las canteras o yacimientos de arcillas, arenas y limos en cada uno de ellos, en forma tal de contar con una sección transversal que disponga de un núcleo impermeable y espaldones laterales de arena que le dan la necesaria estabilidad. Cuenta con una protección de roca basáltica (Rip-Rap) desde la cota 78,00 metros hasta el coronamiento y protección con enrocado por debajo de esa cota, en el talud mojado de aguas arriba expuesto al oleaje y a la acción directa de las aguas, mientras que en el talud de aguas abajo se ha colocado un cobertura vegetal que evita la erosión provocada por las aguas pluviales que se complementa con una protección de roca en aquellos lugares donde está en contacto con bañados u otros espejos de aguas.

Para minimizar eventuales filtraciones en su basamento, se construyó una pantalla de cemento bentonita cuando el techo de roca sana para fundar el núcleo impermeable se encontraba a gran profundidad, para evitar de esta forma grandes volúmenes de excavación y posterior relleno. La pantalla constituye una membrana flexible e impermeable de 60 cm de ancho. La misma se profundiza hasta encontrar el techo de roca, asegurando un manto impermeable continuo que se prolonga en el núcleo de arcilla de la Presa.

Todas las presas, que en conjunto suman un volumen total aproximado de 66 millones de m<sup>3</sup> están rematadas por un camino pavimentado en su coronamiento. Dichos caminos configuran el Camino Internacional, vinculación vial entre ambas márgenes, que corre sobre la Presa Principal Izquierda, Presa de Cierre del Brazo Principal y parte de la Presa Isla, puentes de aguas arriba del vertedero Principal y de la Central, por una parte, y por la otra caminos de servicio para los tramos restantes. El camino internacional reúne los requisitos de construcción, paquete estructural, señalización vertical y horizontal, guarda-rails, etc. que rigen para ambas márgenes

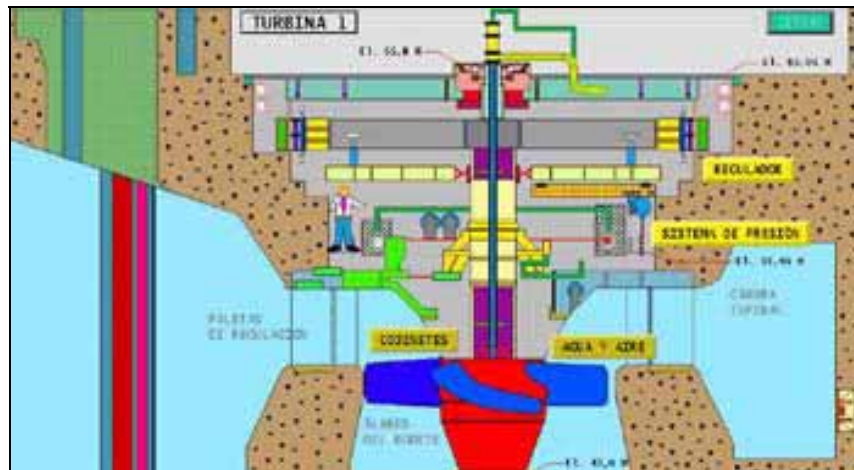
### **1.2.7 TURBINAS Y GENERADORES**

La casa de máquinas tiene 70 metros de altura medidos desde los cimientos hasta el techo. La caída de agua (15 metros actualmente; 21,3 metros cuando se alcance la cota 83 msnm) tiene un caudal medio de 8.000 metros cúbicos por segundo que pasan por las turbinas y producen energía en forma continua. Para comparar dimensiones, las cataratas de Iguazú tienen 70 metros de altura y un caudal medio de 1.750 m<sup>3</sup>/s (la quinta parte del caudal turbinado por Yacyretá).

Cada Unidad Generadora de la Central consta de una turbina Kaplan de eje vertical acoplada directamente a un generador (ver figura 1.2.7). La línea media del distribuidor está ubicada a cota 52,00 metros.

Con un salto nominal de 21,30 metros, las turbinas (de un diámetro de rodete de 9,50 metros) a la velocidad de rotación de 71,4 r.p.m., poseen una potencia nominal de 154 MW. Pueden trabajar con un rango de caudales comprendido entre 376 y 830 m<sup>3</sup>/s.

Con el salto actual de 14,5 metros, la potencia operable es de unos 90MW. Los generadores tienen una potencia nominal continua de 172,5 MVA, con factor de potencia de 0,9. Consta de 42 pares de polos y generan en 13,2 kV y 50 Hz. La excitación de los generadores es del tipo estático de alta velocidad de respuesta.



*Figura 1.2.7 Corte Transversal de una Turbina*

## 1.2.8 GRÚAS

Cuatro Puentes Grúa recorren la longitud total de las Naves de Montaje y Sala de Generación. Los dos Principales con 330/50 Tn de capacidad y 27 metros de luz, cumplen el servicio esencial de instalación y remoción del conjunto de rotores de los generadores y del conjunto de rodetes para las turbinas hidráulicas, teniendo a su vez una función secundaria de apoyo a las Grúas Auxiliares.

Los dos Puentes Grúas denominados Auxiliares con 40,25 Tn de capacidad y 25 metros de luz, realizan el servicio de instalación y remoción de todos los conjuntos, subconjuntos menores y componentes de la Central.

En la estructura de Toma, una Grúa Pórtico de 525 Tn de capacidad y 6,60 metros de trocha, con tres guinches fijos de 175 Tn cada uno, sirve para el cierre de emergencia de la Unidad, mediante tres compuertas aptas para tal función.

En esta estructura de Toma se instalan además dos Grúas Pórtico equipadas cada una con un guinche Principal de 160 Tn. y otro auxiliar de 40 Tn. Su función principal es la instalación o

remoción de ataguías, para el cierre de los pasajes de toma de una Unidad en ocasión de su mantenimiento.

Una Grúa Puente para mantenimiento de compuertas y ataguías de 55 Tn y 17,50 metros de luz se utiliza en los talleres de la Central para el movimiento de equipos y la reparación de compuertas.

### **1.2.9 COMPUERTAS Y ATAGUÍAS**

El vertedero del Brazo Principal tiene 18 Compuertas Radiales de 15 metros de ancho y 20,50 metros de altura. El equipo de compuertas cuenta con sistemas de operación mediante cilindros hidráulicos.

El vertedero Aña-Cuá tiene 16 Compuertas Radiales de 15 metros de ancho por 17,30 metros de alto. Sólo se diferencian con las del Brazo Principal por su menor altura. Cuenta con un grupo generador diesel que en caso de emergencia asegura la operabilidad del sistema.

### **1.2.10 INSTALACIONES ELÉCTRICAS**

Cada Generador se conecta a un transformador en 13.200 V por medio de barras blindadas aisladas en aire. Los transformadores elevadores son trifásicos con 172,5 MVA de relación 13,2/500 kV del tipo intemperie y refrigeración a aceite forzado - aire forzado. Se encuentran también en uso dos autotransformadores de 500/220 kV para alimentar las líneas a Paraguay.

El sistema de maniobras de la Central en 500 kV es del tipo blindado, aislado con gas inerte SF<sub>6</sub> (hexafluoruro de azufre). Cuenta con un doble juego de barras colectoras dispuestas de tal modo de asegurar el suministro a los sistemas de transmisión de ambos países en forma interconectada.

El sistema de alta tensión se ubica aguas abajo de la Central, sobre la plataforma de los Tubos de Aspiración y termina en sendos pórticos de salida de líneas, en los extremos de la Central y en un pórtico intermedio entre las unidades N° 10 y N° 11. La estación ubicada en Rincón Santa María (próxima a Ituzaingó) interconecta la Central con el sistemas de Transmisión Argentino y la ubicada en Ayolas con el Sistema de Transmisión Paraguayo.

## **1.3 BREVE DESCRIPCIÓN DEL RÍO PARANÁ**

El río Paraná nace de la confluencia de dos importantes ríos brasileños: los ríos Grande y Paranaíba, aproximadamente, a 20° de latitud sur y 51° de longitud oeste. Desde su formación, en la confluencia de los ríos mencionados, tiene un ancho superior a 1 km y un caudal mínimo de más de 1.000 m<sup>3</sup>/s

Considerándolo en conjunto con el río Paranaíba, su prolongación natural, el río Paraná tiene una extensión de alrededor de 4.000 km.



Todo el alto Paraná presenta características morfológicas semejantes: un río de planicie, de gran ancho y numerosas islas.

#### 1.4 BREVE DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DE APORTE

La cuenca imbrífera, es decir la que tributa con sus aportes hídricos al río Paraná y sus afluentes, suma 970.000 km<sup>2</sup> (ver figura 1.4.1).



**Figura 1.4.1** Principales cuencas de Sudamérica

La cuenca del río Paraná es en realidad una subcuenca de la cuenca del Río de la Plata, también llamada la cuenca del Plata, la cual es la segunda en importancia en América del Sur,

después de la cuenca del Amazonas, con una superficie aproximada de 4.500.000 km<sup>2</sup> repartidos entre Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay. De aquella subcuenca nos interesa en particular la parte que comprende desde la presa de Itaipú hasta el cierre de la presa de Yacretá. Esta porción de la cuenca tiene una extensión aproximada de 69.230 km<sup>2</sup>.

Las precipitaciones medias acumuladas en la zona de Posadas son iguales a 169 mm mensuales y 2.024 mm anuales, tomando como referencia los últimos seis años. En la figura 1.4.2 se puede observar la variación estacional de las lluvias medias mensuales acumuladas, dichas lluvias se toman como representativas de la cuenca de aporte directa.

La actividad antrópica es importante desde el punto de vista la calidad del agua del embalse, ya que gran parte de la contaminación que provoca el hombre, va a parar al embalse, utilizando al agua como vehículo, tanto sea por arrastre como por solución. Sobre la cuenca existe una baja densidad de población, que podemos promediar en 30 hab/km<sup>2</sup>. Las principales actividades humanas que se dan sobre el terreno en cuestión son principalmente agrícolas-ganaderas y forestación. No existe un censo industrial en la zona que cuantifique sus aportes.

Las principales fuentes de contaminación derivadas de la actividad antrópica de ambas márgenes son los vertidos cloacales crudos sin tratamiento secundario, sobre arroyos que desembocan en el río Paraná, y los lixiviados de basurales a cielo abierto que siguen el mismo recorrido.

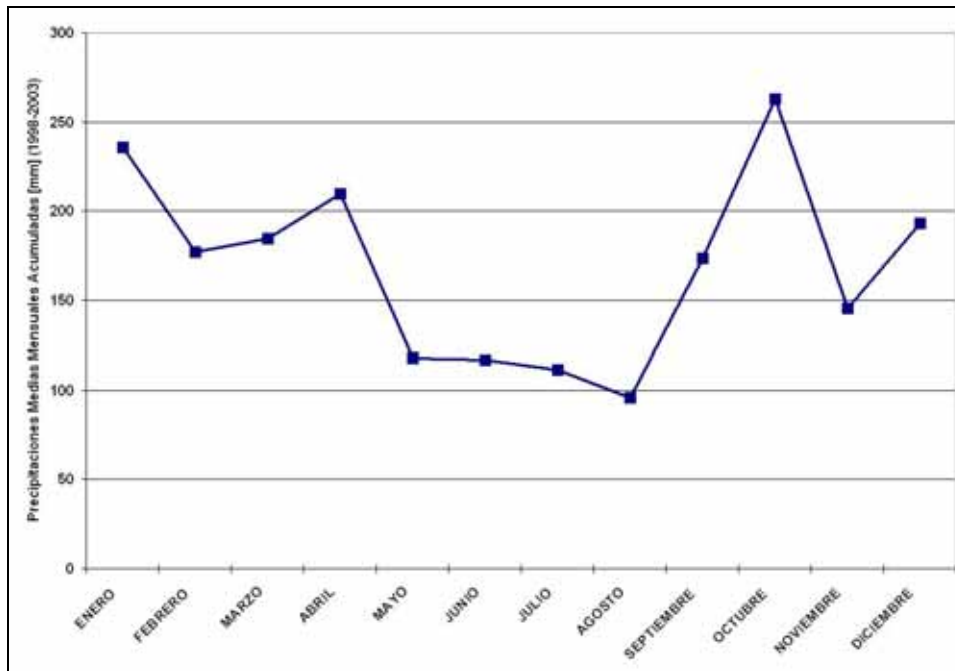


Figura 1.4.2 Precipitaciones medias mensuales acumuladas, periodo 1998-2003

## 1.5 ANTECEDENTES

### 1.5.1 ESTUDIOS PREVIOS RELACIONADOS A YACYRETÁ

Existen numerosos estudios, proyectos y trabajos realizados sobre el aprovechamiento hidroeléctrico Yacyretá, con distintos enfoques y realizados por distintas consultoras. Estos se resumen a continuación:

- Estudios de sedimentación para actualizar la definición de la vida útil del embalse del complejo hidroeléctrica Yacyretá (NHC, GLM&A, y EVARSA, 2002 )
- “*Diagnóstico das condições sedimentológicas dos principias rios brasileiros*”, Electrobras, 1992.
- Estudio hidrológico y sedimentológico del Río Alto Paraná. Tomo I. (Concap, 1973).
- Estudio de Factibilidad Técnico Económico Financiero del Aprovechamiento del Río Paraná a la altura de las islas Yacyretá y Apipé. Volumen III (Harza y Asociados, 1973).
- Estudio Hidrológico e Hidráulico de tributarios del Río Paraná en el tramo comprendido entre el Río Iguazú y la sección Posadas-Encarnación (Litwin y Molas Franco para COMIP, 1987).
- Geología y geotecnia del área del Proyecto Yacyretá. Publicación interna EBY.
- Sistema de información sobre calidad de agua para el alerta hidrológico de la cuenca del Río de La Plata (CIC, 1998).
- Estudios de sedimentación para los embalses de Itaipú y Salto Caxias.
- Pronóstico de sedimentación en los microembalses del Brazo Aña-Cuá creados por azudes sumergibles (FICH para la EBY, 1998).
- Manual de Operación del Embalse. Rev. 2. (CIDY, 1998).
- Planimetría actualizada a cota definitiva, Planos (CIDY, 2001).
- Mapas de uso de tierra y cobertura vegetal (Argentina y Paraguay). Planos (COMIP, 1986).
- Numerosas publicaciones, informes y presentaciones técnicas vinculadas a estudios de carácter regional acerca de la hidrología, geología y geomorfología de la Cuenca del Río Paraná.

## 1.5.2 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

La metodología de estudio se basa en dos modelos, un modelo hidrodinámico y otro de transporte.

En relación al modelo hidrodinámico, generalmente se utilizan técnicas eulerianas basadas en alguno de los siguientes tres métodos:

- El método de las diferencias finitas (MDF), el más antiguo y difundido, que parte de una división del dominio a una grilla regular. Si las ecuaciones a discretizar están referidas a un sistema de ejes cartesianos, las celdas de la grilla tienen forma rectangular, lo que produce alguna limitación en cuanto a la representación de los contornos. Como ejemplos se citan los software bidimensionales HIDROBID II (Menéndez, 1985) y MIKE21 (DHI), y los tridimensionales COHERENS (Marine Science and Technology Programme, MAST-III) y POM (Blumberg & Mellor, 1970).
- El método de los elementos finitos (MEF), más moderno que el anterior, bastante difundido en la actualidad. En este caso se transforman las ecuaciones a una forma integral y se discretizan estas últimas. Presenta la ventaja que es más flexible en cuanto a la forma de los contornos que pueden ser representados, ya que la grilla puede ser irregular. La desventaja, que puede ser importante en algunos casos, es que el método, por la forma en que está planteado (más precisamente, por la función de peso que utiliza), no conserva los flujos que se intercambian entre los elementos, lo que se traduce en la no conservación de la masa total del sistema. Como ejemplo se citan los software bidimensionales DYNA 2D (AEN, Agencia de energía nuclear francesa) y RMA2 (USACE).
- Otro método, un poco menos difundido que el anterior, es el método de los volúmenes finitos (MVF). En este caso también se discretizan versiones integradas de las ecuaciones diferenciales sobre una grilla irregular, pero se utiliza una función de peso tal que los flujos entre los elementos (verdaderos volúmenes de control) son iguales entre sí. Este método conserva la flexibilidad del MEF, pero agrega la conservación de la masa, a costa de alguna complejización algebraica.

Con respecto al modelo de transporte de sólidos en suspensión, es conveniente distinguir entre las técnicas eulerianas y lagrangianas.

- Las técnicas eulerianas se basan en un planteo de conservación de la masa sobre volúmenes de control fijos. Las ecuaciones de transporte resultantes pueden ser discretizadas de la misma forma que las citadas anteriormente para el modelo hidrodinámico (MDF, MEF y MVF). La desventaja de este tipo de técnicas consiste en que la difusión numérica introducida por el método puede ser comparable o incluso superior a la propia difusión física si el paso de discretización no es lo suficientemente pequeño, lo cual se traduce en soluciones artificialmente suavizadas. Ejemplos de software bidimensional son el WASP 6 (Di Toro et al., 1983; Connolly and Winfield, 1984; Ambrose, R.B. et al., 1988) y el SED2D (USACE), y de tridimensional el COHERENS (Marine Science and Technology Programme, MAST-III).

- Las técnicas lagrangianas, en cambio, plantean la conservación de la masa siguiendo la trayectoria de las partículas fluidas. Su ventaja, a costa de alguna complicación algebraica, es que la difusión numérica puede controlarse sin necesidad de recurrir a densificaciones extremas de los nodos de cálculo. La desventaja es que en general exigen más poder de cálculo y tiempo de máquina.

Dentro de las técnicas lagrangianas se destacan dos modelos de cálculo:

- El modelo gaussiano, donde la concentración de los sólidos suspendidos son representados por campanas de Gauss, y de la integración de esa campana se obtiene la masa de sólidos. Con este método se pueden simular fuentes puntuales o continuas y emisiones pulsantes o continuas. El resultado final para fuentes continuas y/o emisiones continuas se obtiene superponiendo las contribuciones de cada campana en un punto del dominio. Su desventaja es la limitación del modelo cerca de contornos rígidos, a menos que se recurra a técnicas de imágenes. Como ejemplo se cita el software bidimensional MANCHAS (Menéndez et al., 1990).
- El modelo de partículas, en el que cada partícula lleva la masa concentrada, y de su sumatoria se obtiene la concentración en cada zona. También se pueden simular fuentes puntuales o continuas y emisiones pulsantes o continuas. La desventaja que presenta, respecto de las anteriores, reside en la necesidad efectuar el seguimiento de una enorme cantidad de partículas para poder obtener una buena representación, lo que se traduce en grandes costos computacionales. Esto se puede mitigar utilizando técnicas de paralelización (MPI, PVM, etc.). Como ejemplo se citan los softwares tridimensionales PARTICULAS (Tarela, 2000) y COHERENS (Marine Science and Technology Programme, MAST-III).

La técnica a utilizar depende del problema a resolver, es decir, no existe a priori una técnica mejor que otra.

Para el presente problema se seleccionaron los siguientes métodos:

- *Modelo hidrodinámico:* Dado que estudios previos mostraron que en el embalse de Yacyretá no se produce, ni se producirá a cota futura, una estratificación térmica significativa (Morillo & Tarela, 2002), es suficiente utilizar un modelo bidimensional en planta para describir la hidrodinámica del embalse. Se seleccionó el software HIDROBID II (Menéndez, 1990), de desarrollo propio en el INA, sobre el que se tiene gran experiencia de uso y que ha demostrado su adecuación en una gran variedad de estudios sobre el río Paraná.
- *Modelo de transporte de sólidos suspendidos:* Por la misma causa que antes, resulta suficiente con una modelación bidimensional en planta. Se seleccionó el software MANCHAS (Carreras & Menéndez, 1990), que también es de desarrollo propio en el INA, de tipo lagrangiano, y que ya ha sido experimentado en una variedad de aplicaciones.

## 2 MODELO HIDRODINÁMICO

### 2.1 IMPLEMENTACIÓN

#### 2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO Y DEL ESQUEMA NUMÉRICO

El embalse de Yacypetá puede ser dividido en cuatro secciones (figura 2.1.1), 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 embalse de Yacypetá tiene una extensión del orden de los 100 km, su ancho en la zona lacustre 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 (Abbott 1979).



Figura 2.1.1 Zonificación del embalse

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 (Menéndez 1990), basado en el método de las diferencias finitas y cuyas características técnicas se describen a continuación.

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).

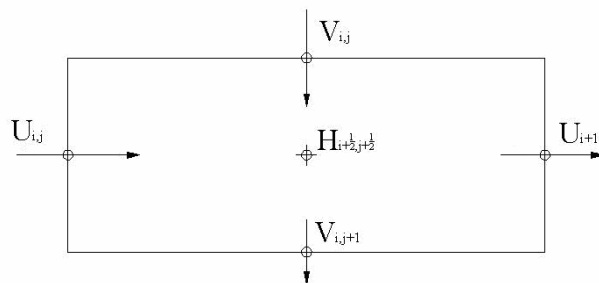
El modelo hidrodinámico está basado en una formulación bidimensional, integrada en la vertical, de las ecuaciones de Navier-Stokes, bajo la hipótesis de aguas poco profundas y flujo turbulento, Abbott (1979). Las ecuaciones resultantes que gobiernan la hidrodinámica son:

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

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

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

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).



**Figura 2.1.2** Celda de cálculo

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 2.1.2), lo que es

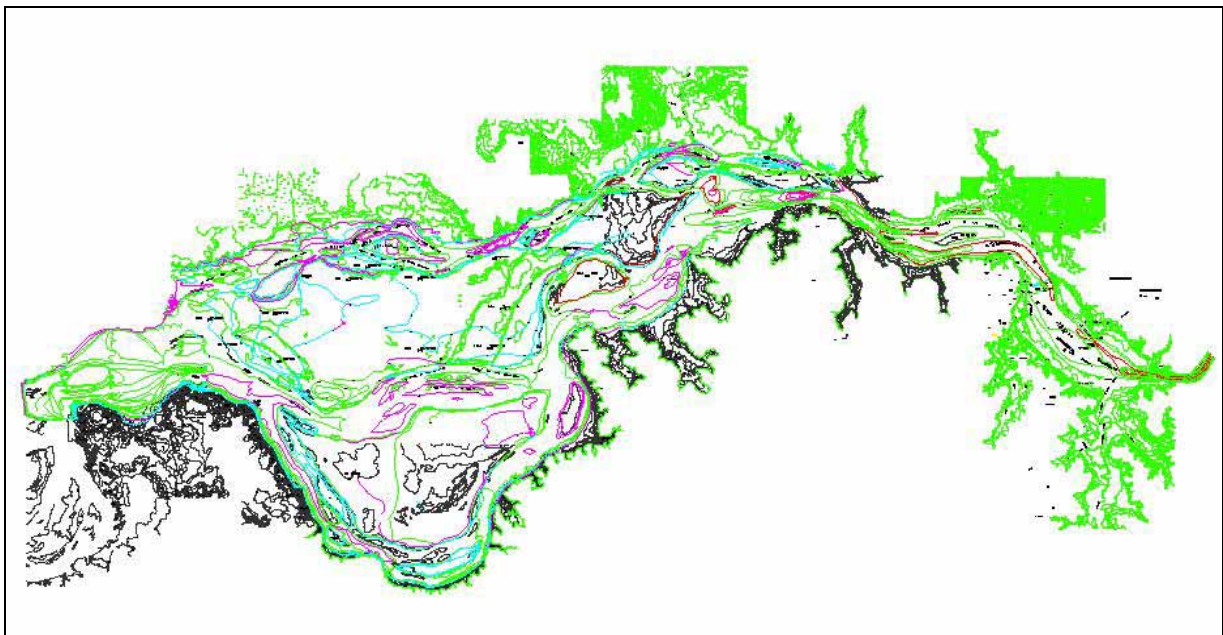
óptimo para aplicar las condiciones de borde. El método es implícito, es decir, conduce a un sistema algebraico acoplado, lo cual tiene ventajas en cuanto a la estabilidad numérica. En el primer paso fraccionario los términos implícitos corresponden a las derivadas según  $x$  y los explícitos a las 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,  $\Delta t < \Delta x / \left[ u \pm (g \cdot h)^{1/2} \right]$ , 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.

La implementación del modelo hidrodinámico del embalse, en base al software elegido, requiere la especificación del modelo numérico del terreno, 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.

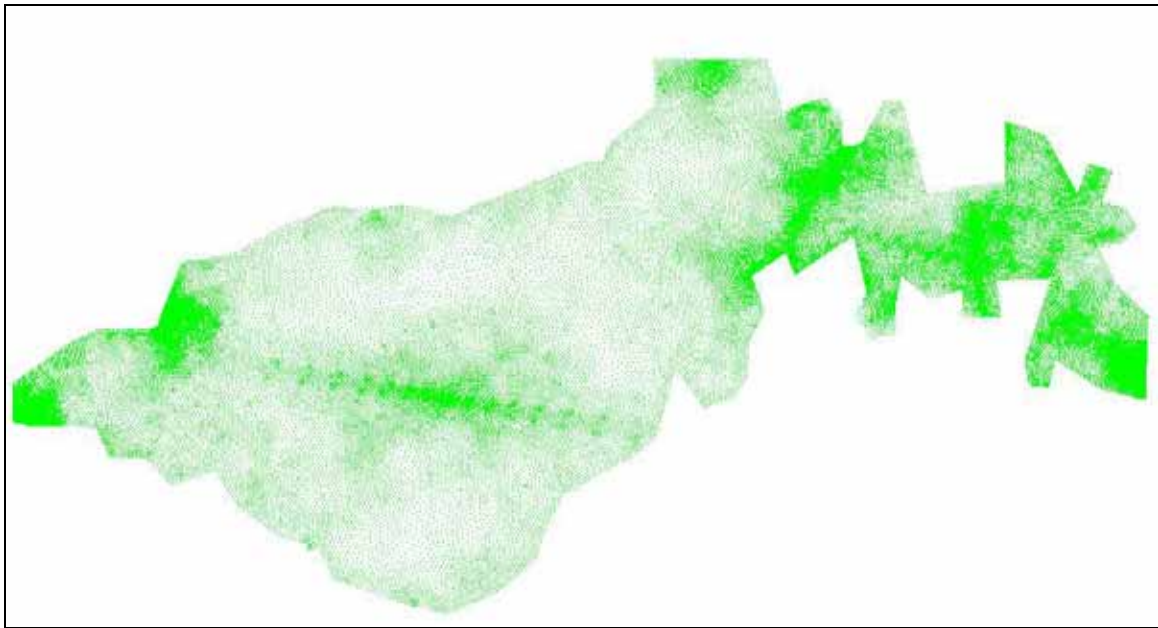
### 2.1.2 DATOS DE BASE

Se dispuso de una base de datos topobatimétricos históricos provista por la EBY, consistente en curvas de nivel para la altimetría y curvas de nivel y puntos acotados para la batimetría, proporcionados en archivo magnético. Los datos son el resultado de la composición de diversas fuentes y presentan algunos baches de información, según se muestra en la figura 2.1.3, en coordenadas de Gauss-Krüger. Fueron provistos en varios archivos por separado, por lo que hubo que realizar un trabajo de composición y edición. Debido a que existían algunos desajustes entre los datos de altimetría y batimetría, se debió realizar una compatibilización entre ambos conjuntos.

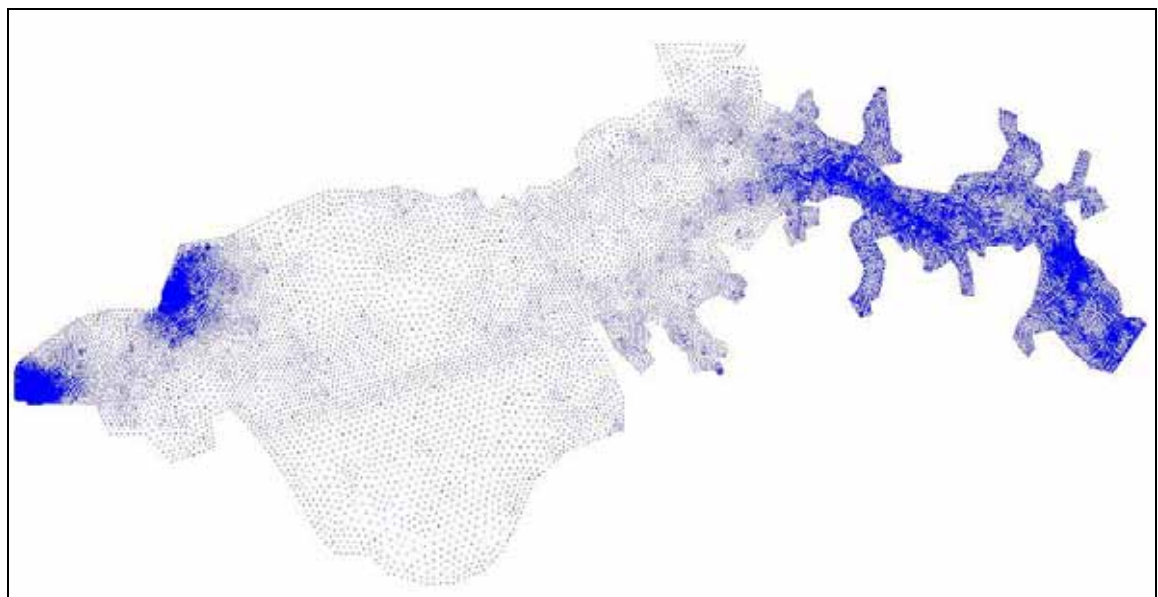


*Figura 2.1.3 Base de datos altimétricos históricos*

Además se recibió la base topobatómetrica utilizada por el Modelo Hidrodinámico Bidimensional de la EBY, implementado en base al software *HYDROSIM* (EBY/INRS-ETE 2002). Esta base, mostrada en la figura 2.1.4, consiste en valores puntuales correspondientes a más de cincuenta mil nodos. Fue construida a partir de la base de datos históricos, pero luego fue ajustada en forma criteriosa para obtener una buena performance del modelo en cuanto a la predicción de niveles. También fue provista la base de datos de más de treinta mil nodos correspondientes a la malla de cálculo de elementos finitos utilizada en ese modelo, la cual se muestra en la figura 2.1.5.

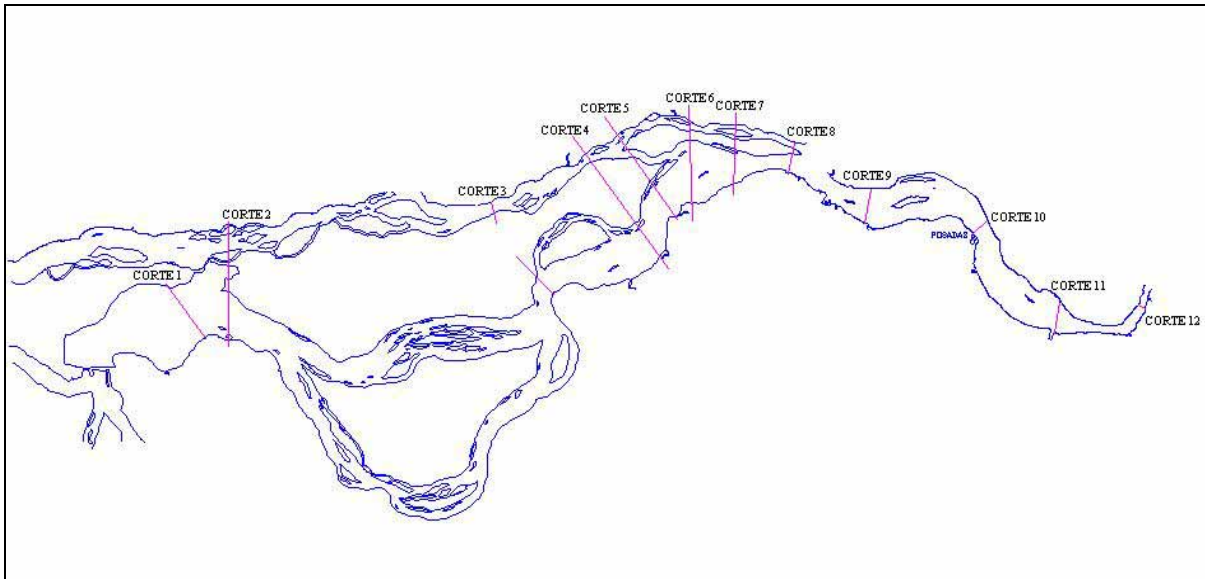


**Figura 2.1.4** Base de datos altimétricos INRS-EBY.

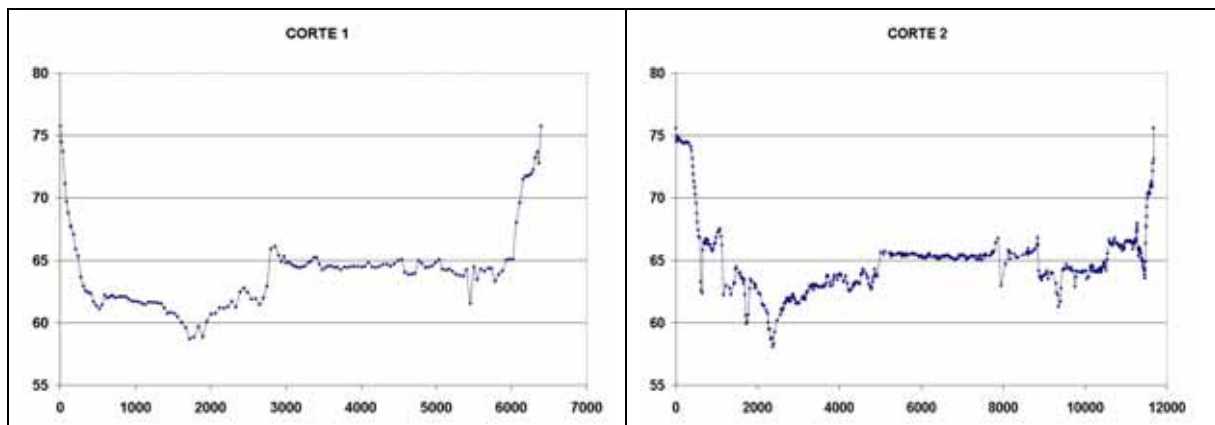


**Figura 2.1.5** Base de datos altimétricos de la malla de elementos finitos del modelo hidrodinámico de la EBY.

También accedió a los relevamientos actualizados de doce secciones transversales efectuados por EVARSA para la EBY durante el estudio de sedimentación del embalse (NHC y otros 2002). La ubicación de estos cortes se muestra en la figura 2.1.6, mientras que la figura 2.1.7 presenta los cortes. Nótese que cubren la zona fluvial (cortes 8 a 12), de transición (cortes 3 a 7) y de descarga (cortes 1 y 2), pero que no proveen información sobre el embalse propiamente dicho.



**Figura 2.1.6** Ubicación de los cortes en planta (numerados de oeste a este)



**Figura 2.1.7** Secciones transversales del embalse (continúa)

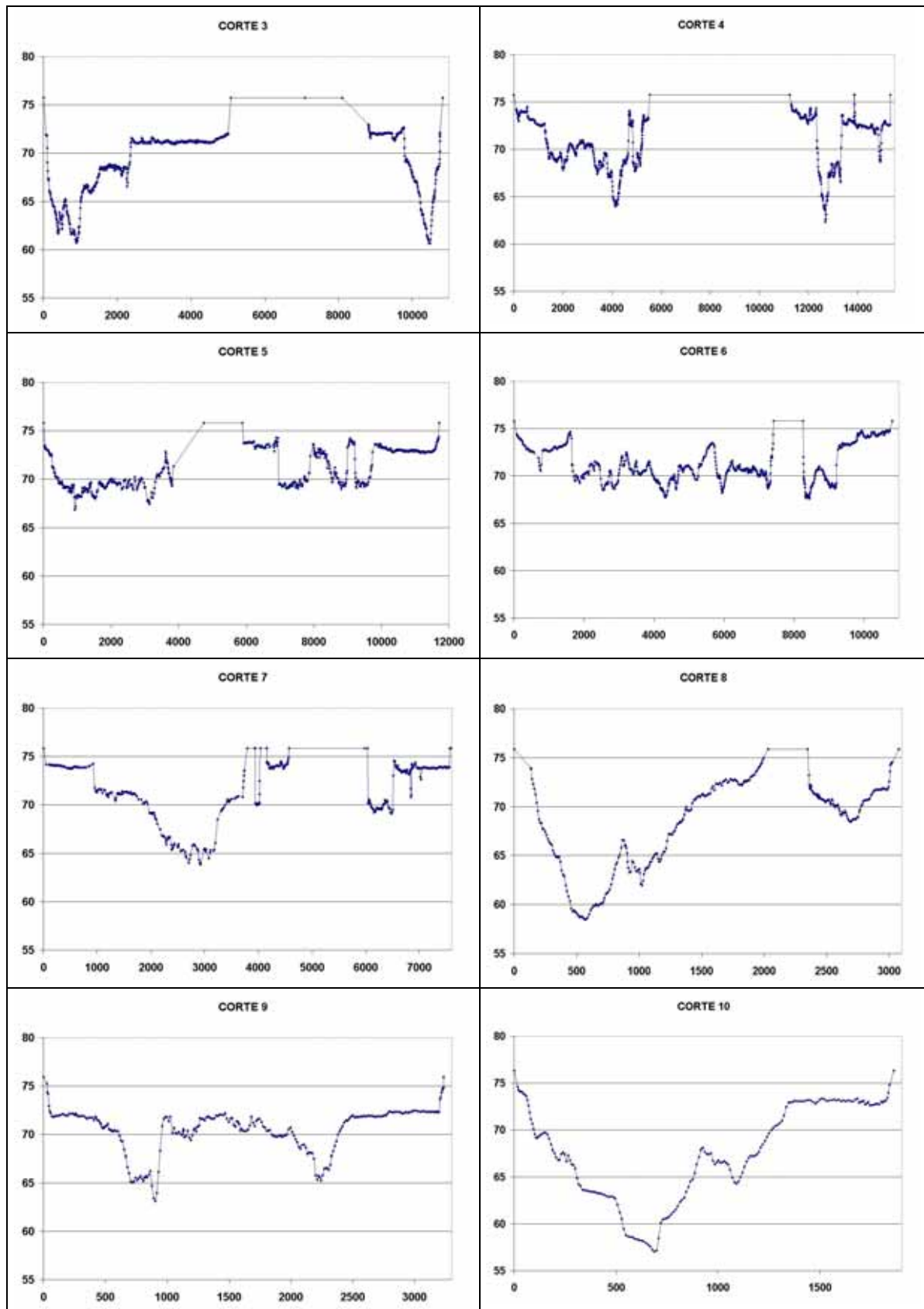
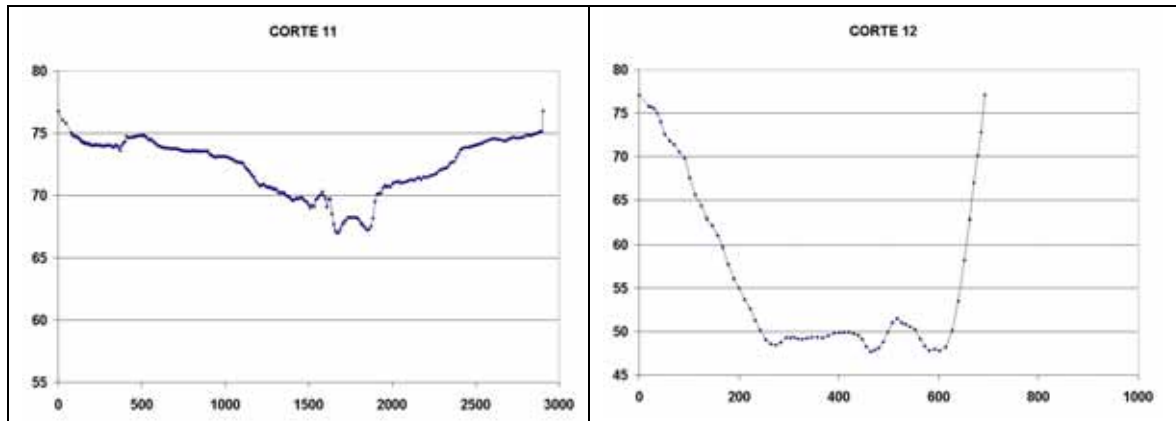


Figura 2.1.7 Secciones transversales del embalse (continúa)



*Figura 2.1.7 Secciones transversales del embalse (final)*

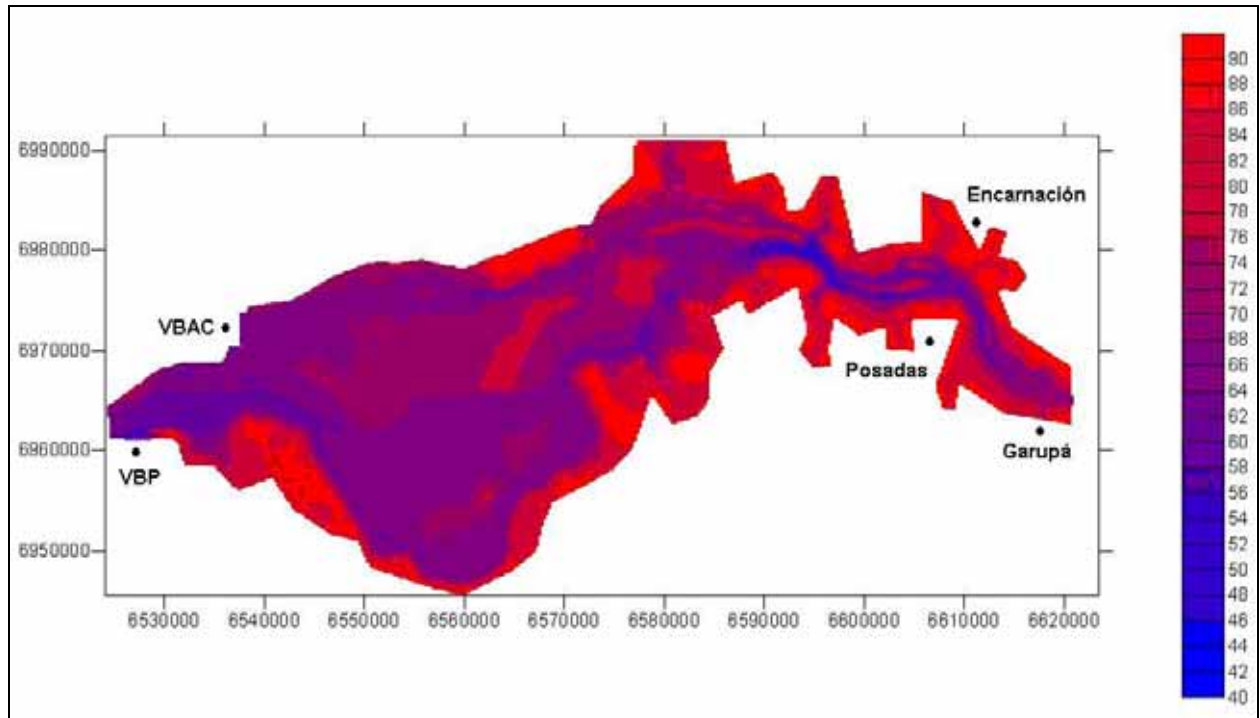
### 2.1.3 GENERACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO DEL TERRENO

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.

La extensión del modelo (ver figura 2.1.8) es desde la desembocadura del arroyo Garupá, aguas arriba de la ciudad de Posadas, hasta la presa. Lo que significa aproximadamente 100 km en la dirección este-oeste, y 45 km en la dirección norte-sur.

Para construir el modelo numérico del terreno se utilizaron los datos históricos y la base de datos del modelo de la EBY. 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 de esta tesis.

Al modelo numérico del terreno obtenido se le efectuaron correcciones manuales para ajustar la batimetría de modo de resultar compatible con la relevada en las secciones transversales. La figura 2.1.8 presenta esta batimetría.



*Figura 2.1.8 Modelo numérico del terreno*

#### 2.1.4 CONDICIONES DE BORDE

La geometría del embalse está definida, en parte, naturalmente por la topografía 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.

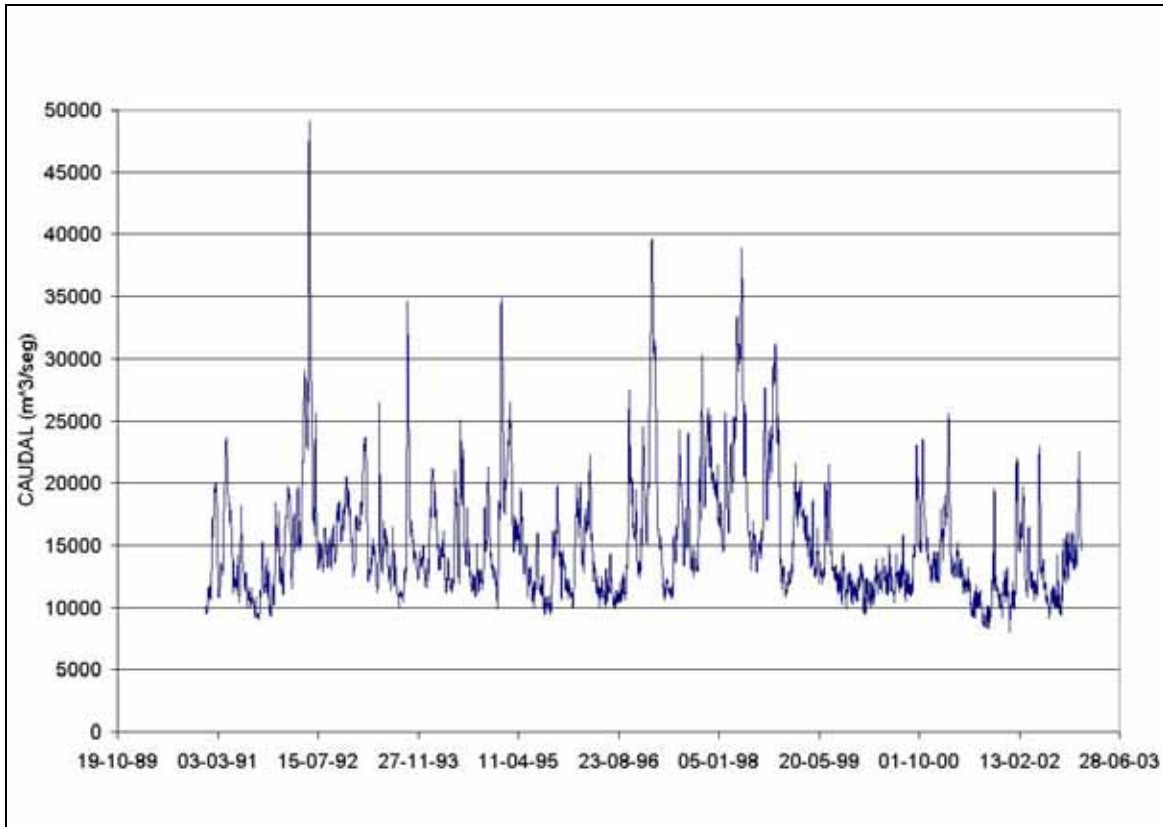
El único tipo de disipación considerada es la debida a la acción del fondo, que genera torbellinos de eje horizontal en dirección lateral al flujo principal. Esta disipación se caracteriza a través del coeficiente de rugosidad de Manning. Un valor típico de este coeficiente para el fondo del río Paraná es 0,025, 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).

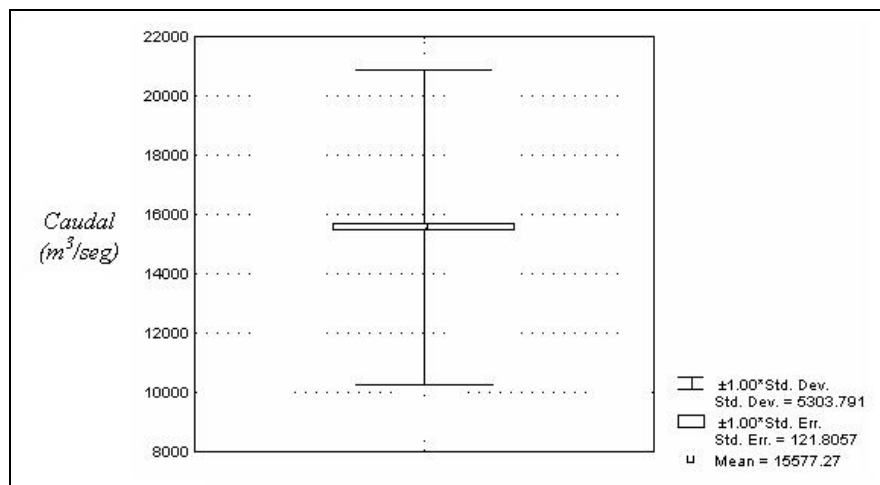
La EBY proveyó la serie diaria de caudales ingresantes al embalse para el período que se extiende desde el 01/Ene/1991 hasta el 17/Dic/2002. Esta se muestra en la figura 2.1.9. Se observa claramente la crecida extraordinaria del año 1998, seguida de un período relativamente seco.

Con esta serie se efectuó un análisis estadístico básico, cuyos resultados se muestran en la figura 2.1.10. Se observa que el caudal medio es de alrededor de 15.000 m<sup>3</sup>/s y la desviación estándar de alrededor de 5.000 m<sup>3</sup>/s.

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



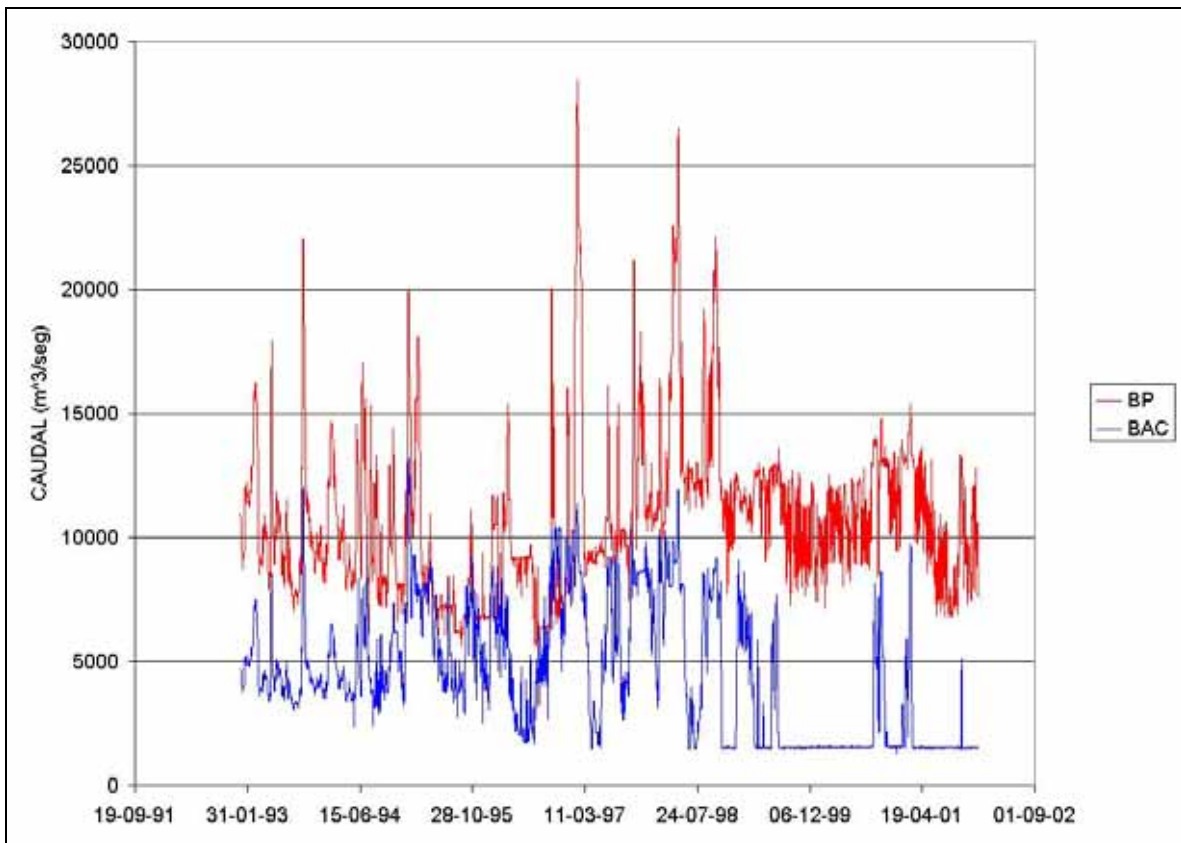
**Figura 2.1.9** Serie temporal de caudales ingresantes al embalse



**Figura 2.1.10** Estadística de caudales ingresantes al embalse

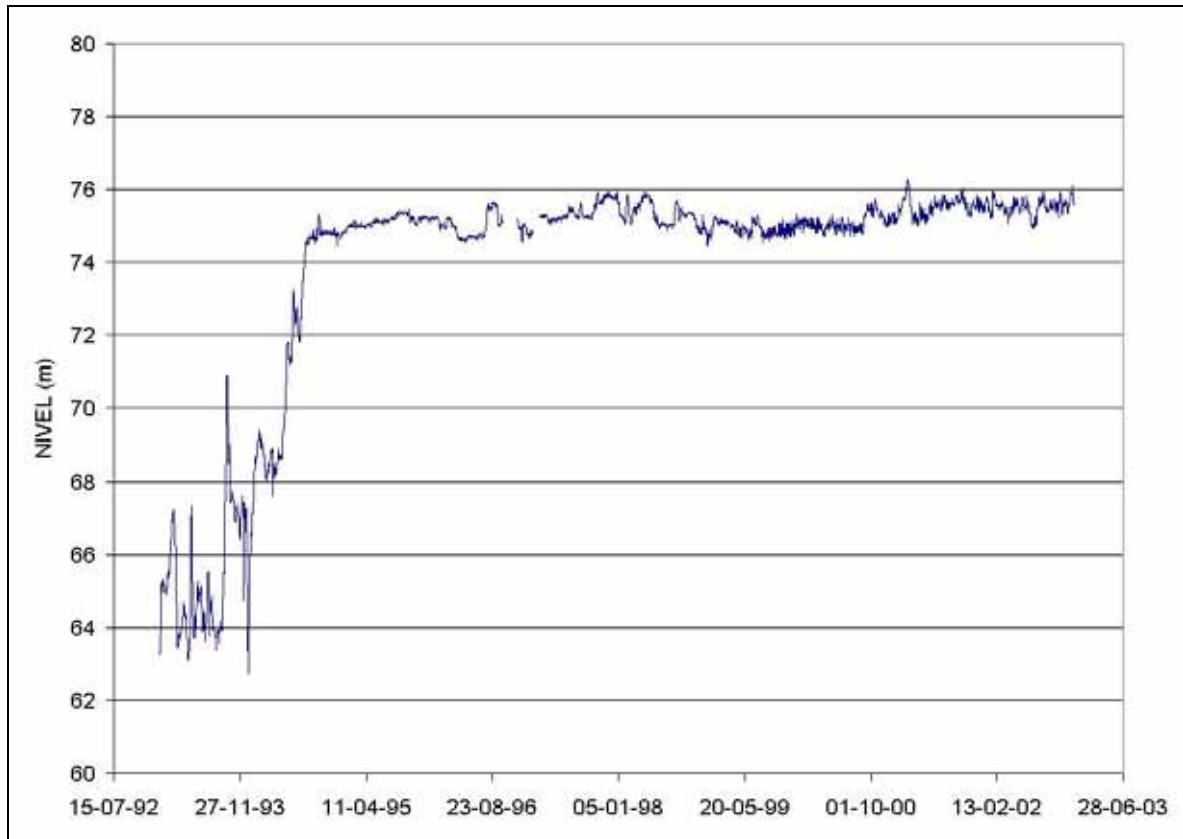
El libre escurrimiento del agua está impedido por la obra, que condiciona el nivel aguas abajo del modelo, produciendo un efecto de remanso.

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). La figura 2.1.11 presenta la partición de caudales entre ambos brazos. Se observa que desde el año 2002 el caudal erogado por el Brazo Aña-Cuá es mantenido prácticamente constante a 1.500 m<sup>3</sup>/s, que es el caudal ecológico establecido. Por su parte, en la figura 2.1.12 se muestra la serie temporal de niveles en el Brazo Principal. Allí se nota que el nivel varía muy poco alrededor de una cota algo inferior a 76 m, con el objetivo de maximizar la capacidad de generación eléctrica.



*Figura 2.1.11 Serie temporal de caudales evacuados por ambos vertederos*

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.



*Figura 2.1.12 Serie temporal de niveles medidos en el Brazo Principal*

## 2.2 CALIBRACIÓN

### 2.2.1 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 las secciones transversales indicadas en la figura 2.1.6, para caudales similares del río, efectuados en oportunidad del estudio de sedimentación (NHC y otros 2002) por EVARSA mediante equipos perfiladores de corriente del tipo ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) y ADV (Acoustic Doppler Velocity).

La figura 2.2.1 presenta la serie de niveles diarios del río Paraná en Posadas.

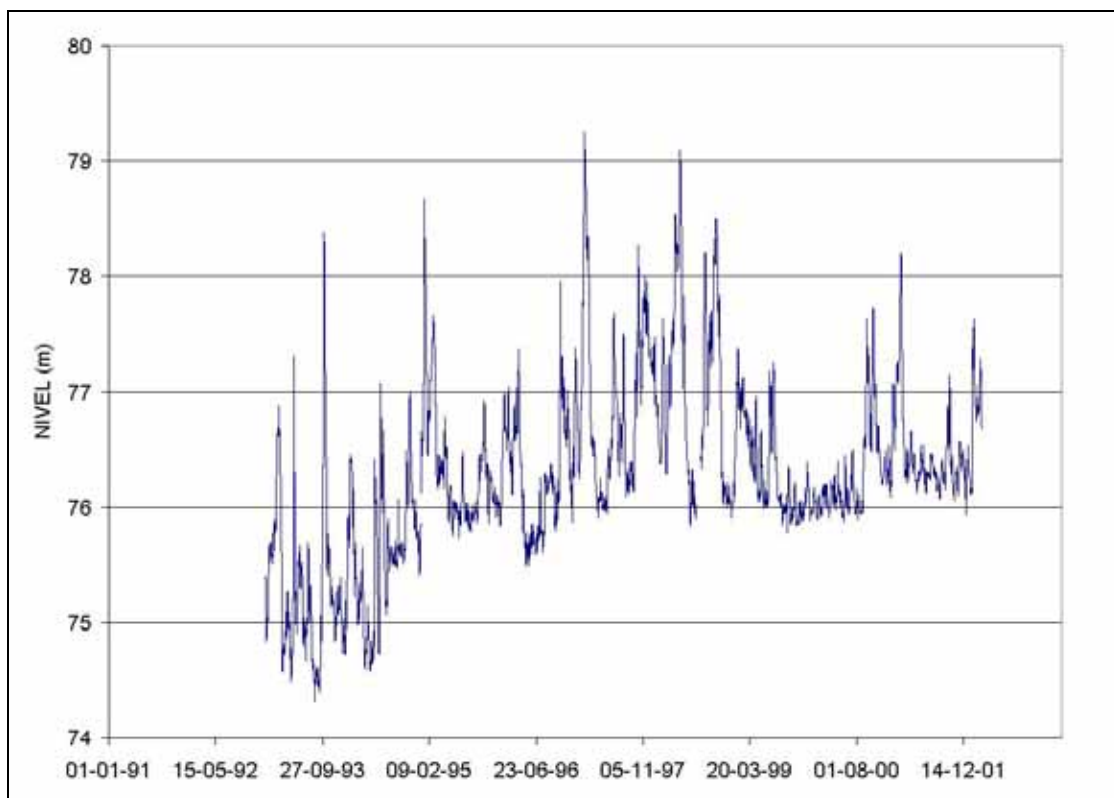
En la figura 2.2.2 (a) se muestra un perfil de velocidades medias verticales tal como fue provisto. De la simple observación surge claramente que hay una dispersión de las direcciones, lo cual es característico de la técnica de medición empleada.

Para usar esta información se procedió a filtrar los perfiles según un criterio de dirección promedio: se calculó la dirección promedio de cada perfil de velocidades y la diferencia local con esa dirección promedio, filtrándose aquellas mediciones que se apartan de la dirección promedio en más de un cierto ángulo especificado. Las figuras 2.2.2 (b), (c) y (d) muestra los perfiles obtenidos tomando como ángulo límite 5°, 10° y 15°, respectivamente. Vale aclarar que este criterio resulta operativo en las zonas donde el escurrimiento tiende a ser unidireccional. En las zonas donde el flujo es más definidamente bidireccional (expansiones y contracciones) debió efectuarse una partición del perfil en varias zonas, a cada una de las cuales se le aplicó el criterio.

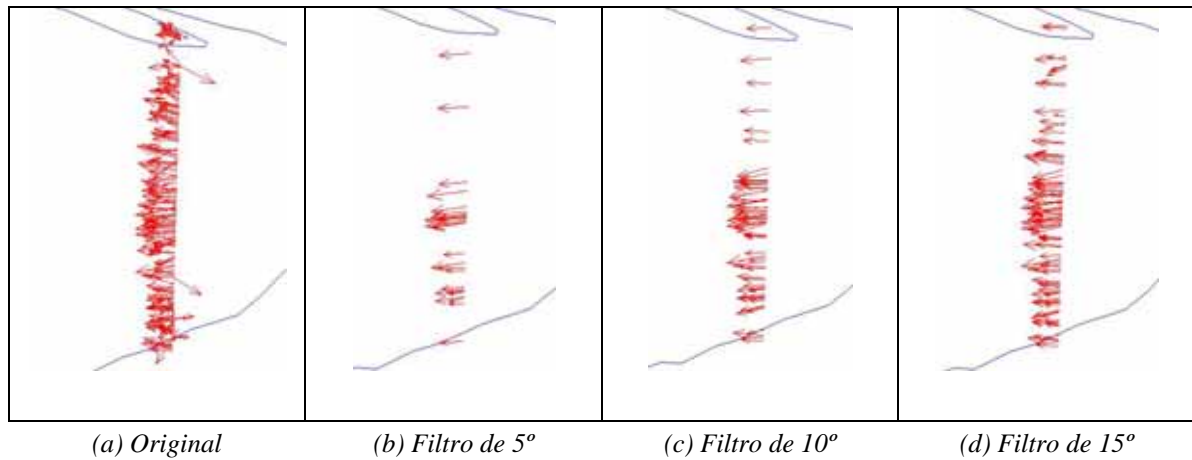
Para la calibración de las velocidades se eligió utilizar las mediciones filtradas según el criterio de los 15°, por aportar suficientes vectores velocidad para realizar comparaciones, y presentar baja dispersión de las direcciones.

Para la calibración se seleccionaron días particulares para los cuales se dispuso de toda la información hidrométrica. Se especificaron la descarga por el brazo secundario 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.



**Figura 2.2.1** Serie temporal de niveles medidos en Posadas



**Figura 2.2.2** Perfil de velocidades en la sección corte siete del brazo principal

Como mecanismos de calibración se dispuso de:

- i. La rugosidad del fondo, eventualmente zonificada.
- ii. La batimetría del fondo, ya que el modelo numérico del terreno presenta imprecisiones.

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 reacomodamiento 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 ( $15.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ), un caudal bajo (alrededor de  $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , obtenido como el valor medio menos la desviación estándar) y uno alto (alrededor de  $20.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , 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.

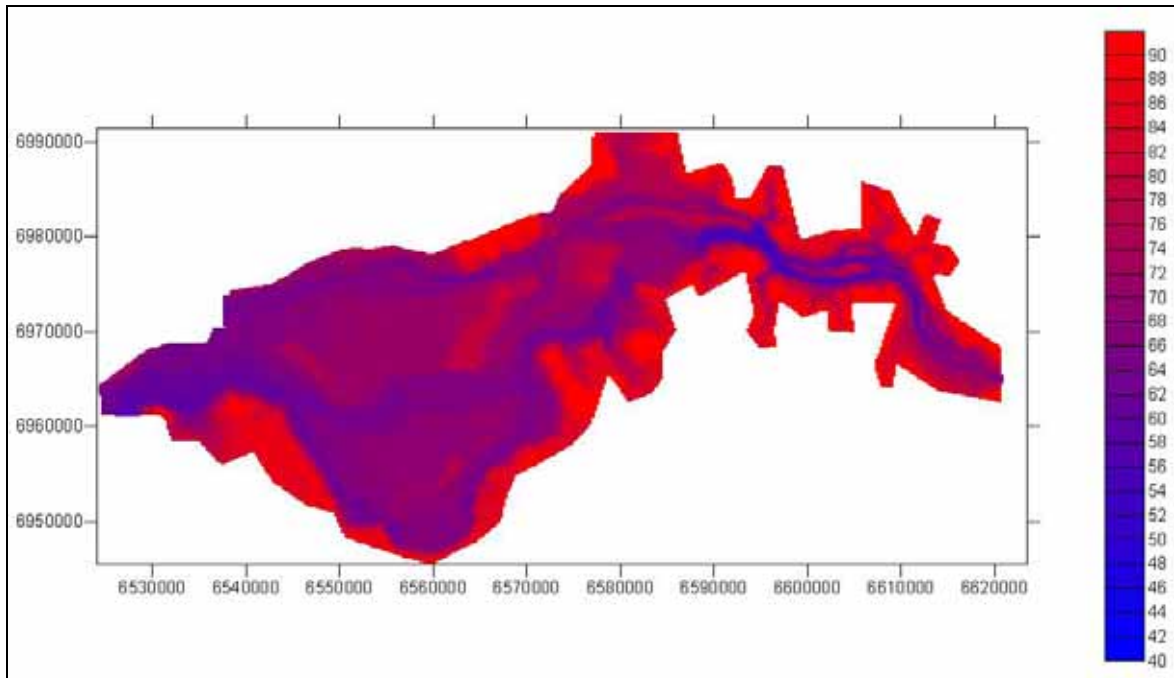
En la tabla 2.2.1 se indican los datos hidrométricos correspondientes a los escenarios de calibración.

**Tabla 2.2.1** 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

## 2.2.2 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Para la calibración no resultó necesario zonificar el coeficiente de rugosidad de Manning, adoptándose finalmente un valor uniforme de 0,020. En la figura 2.2.3 se muestra la batimetría final resultante del proceso de calibración anteriormente descrito.



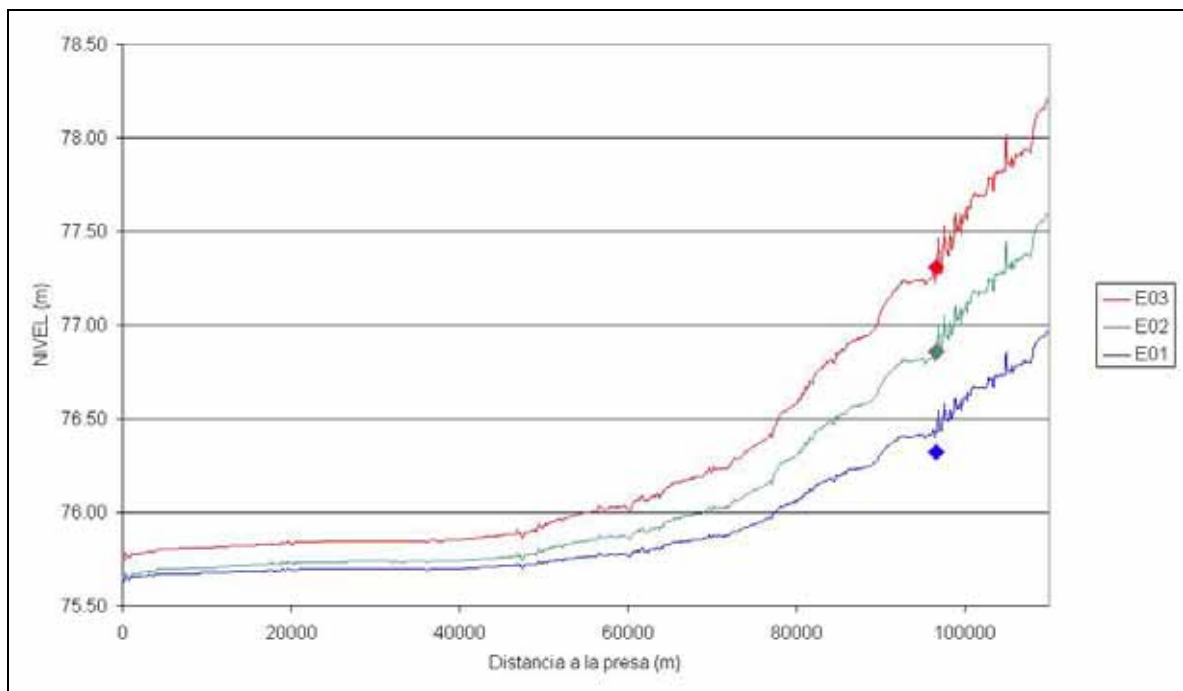
**Figura 2.2.3** Batimetría final

La figura 2.2.4 muestra el perfil del pelo de agua de acuerdo al modelo para los tres primeros escenarios, donde se observa el grado de acuerdo con el correspondiente nivel medido en Posadas. Esta diferencia se presenta, además, en la Tabla 2.2.2. Se observa que el modelo tiende a sobreestimar levemente para caudales bajos y a subestimar levemente para caudales

medios y altos. No resultó posible corregir estas desviaciones, más allá de lo mostrado, al mismo tiempo.

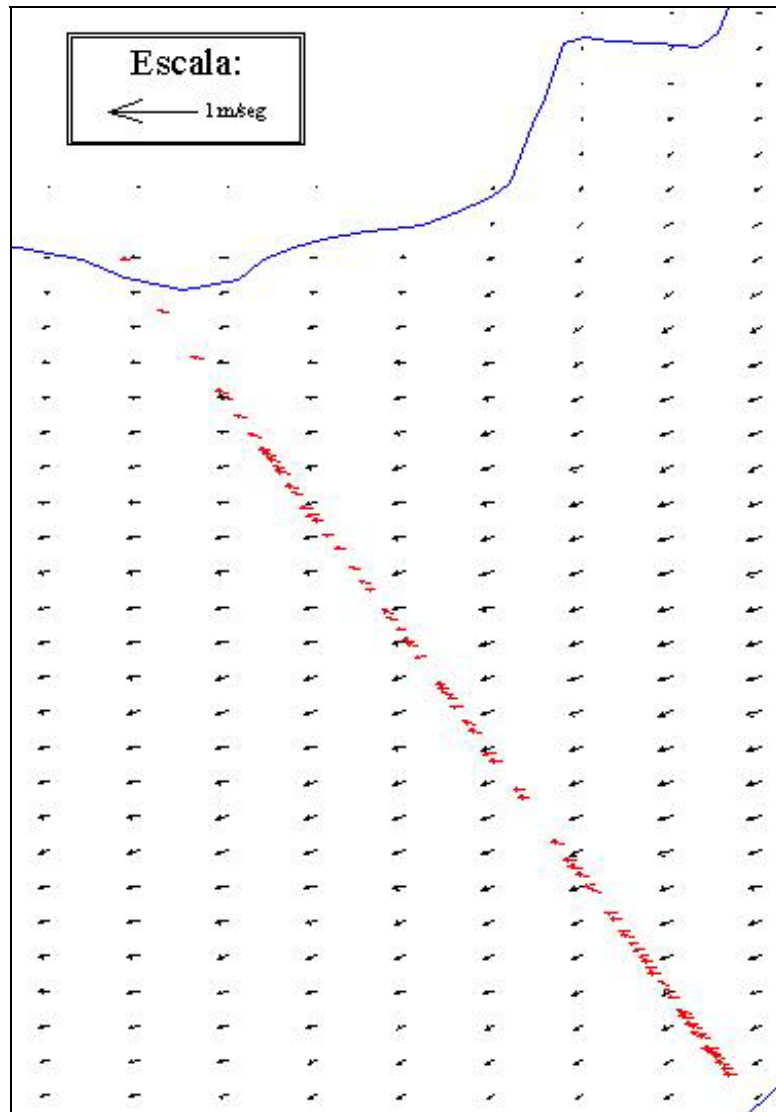
**Tabla 2.2.2** Acuerdo entre niveles medidos y calculados en Posadas

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

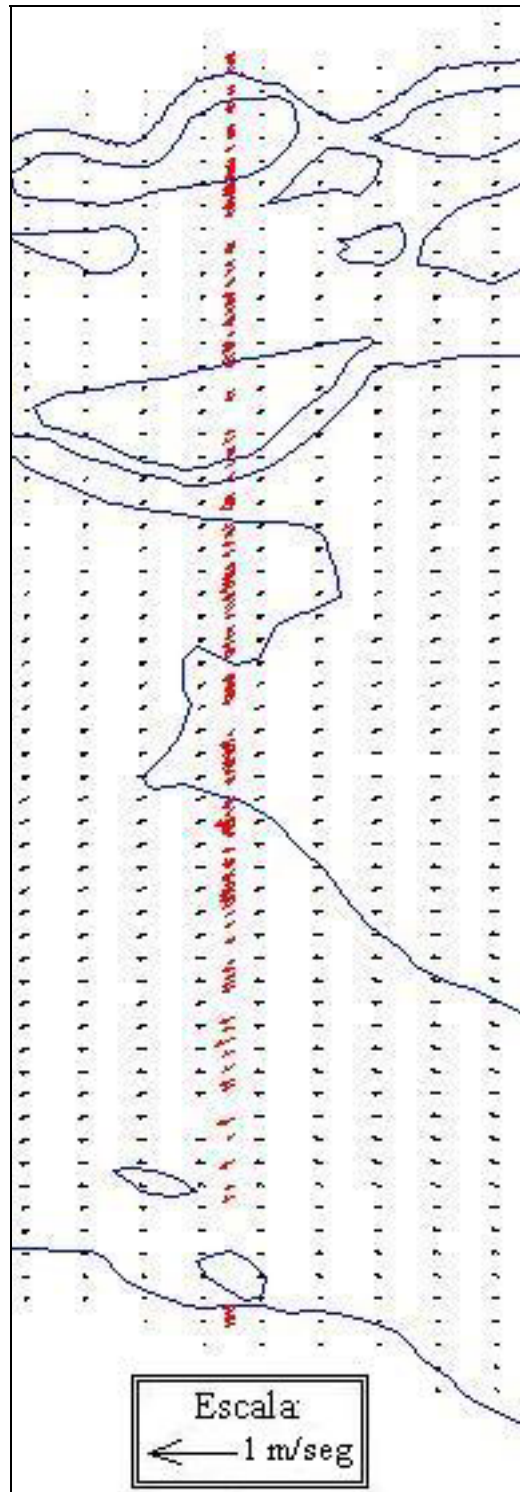


**Figura 2.2.4** Perfiles del pelo de agua para escenarios de calibración

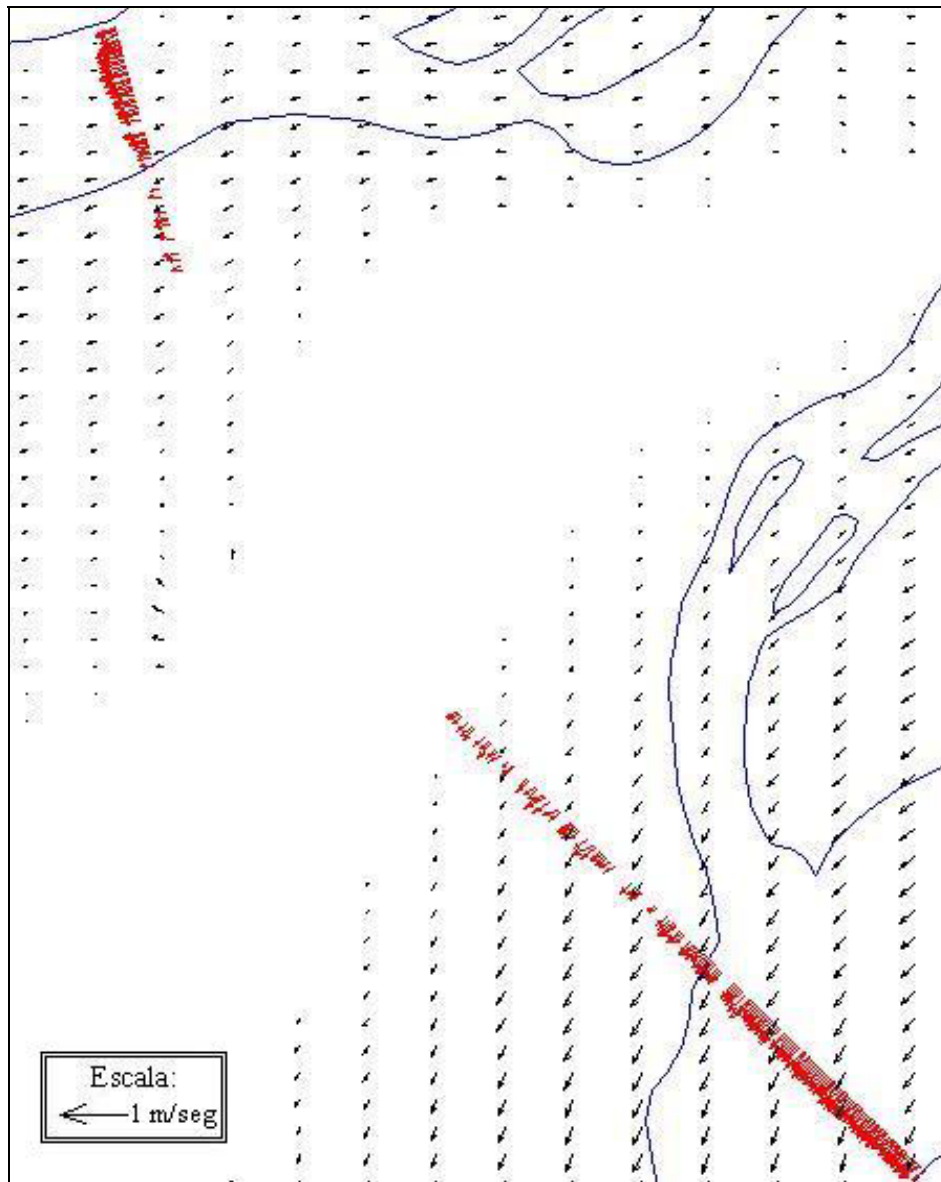
En las figuras 2.2.5 a 2.2.15 se presentan los perfiles de velocidades medidos y calculados para los escenarios restantes. Se observa un acuerdo global satisfactorio, tanto en módulo como en dirección, para la zona de descarga (cortes 1 y 2) y de transición (cortes 3 a 7). En la zona fluvial (cortes 8 a 11) el acuerdo también es bueno en términos generales, aunque la modulación de la intensidad es más suave y continua en el modelo que en la medición.



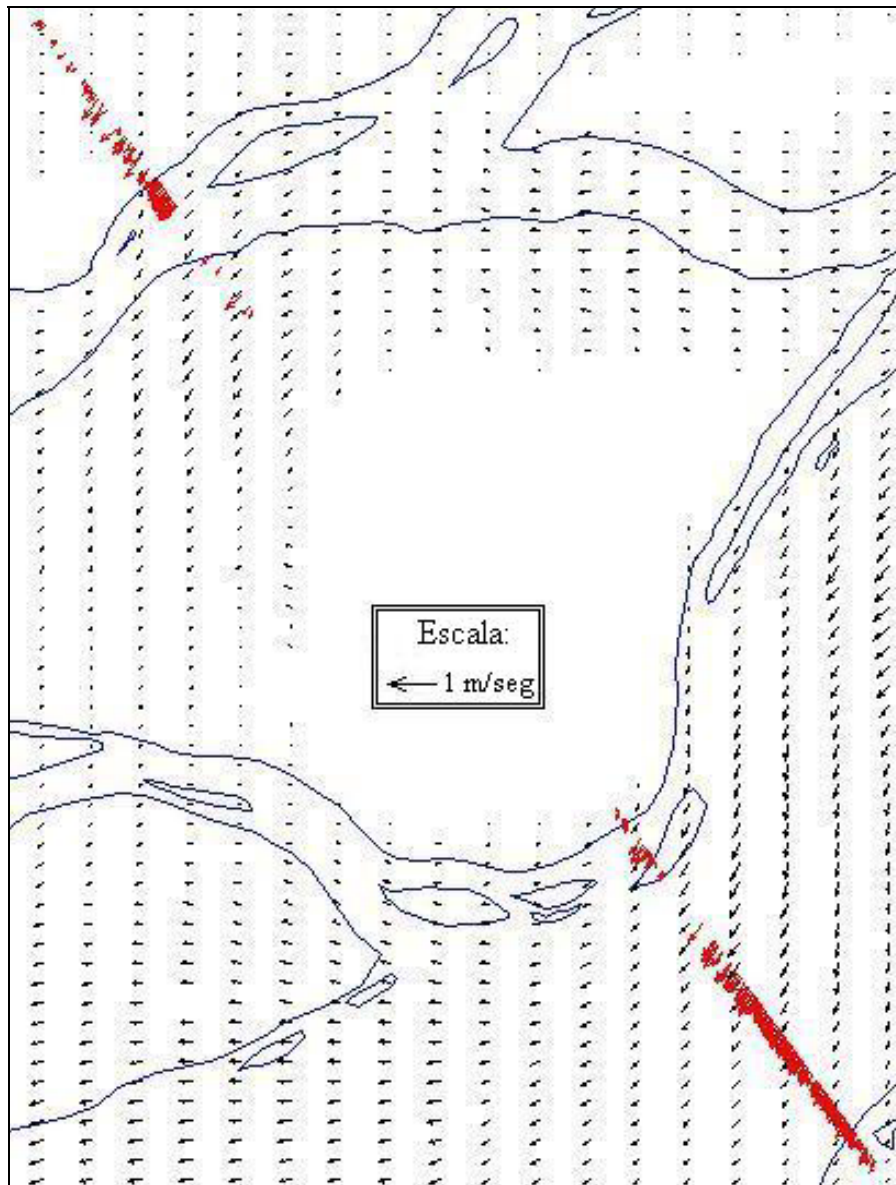
**Figura 2.2.5** Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 1 (E04)



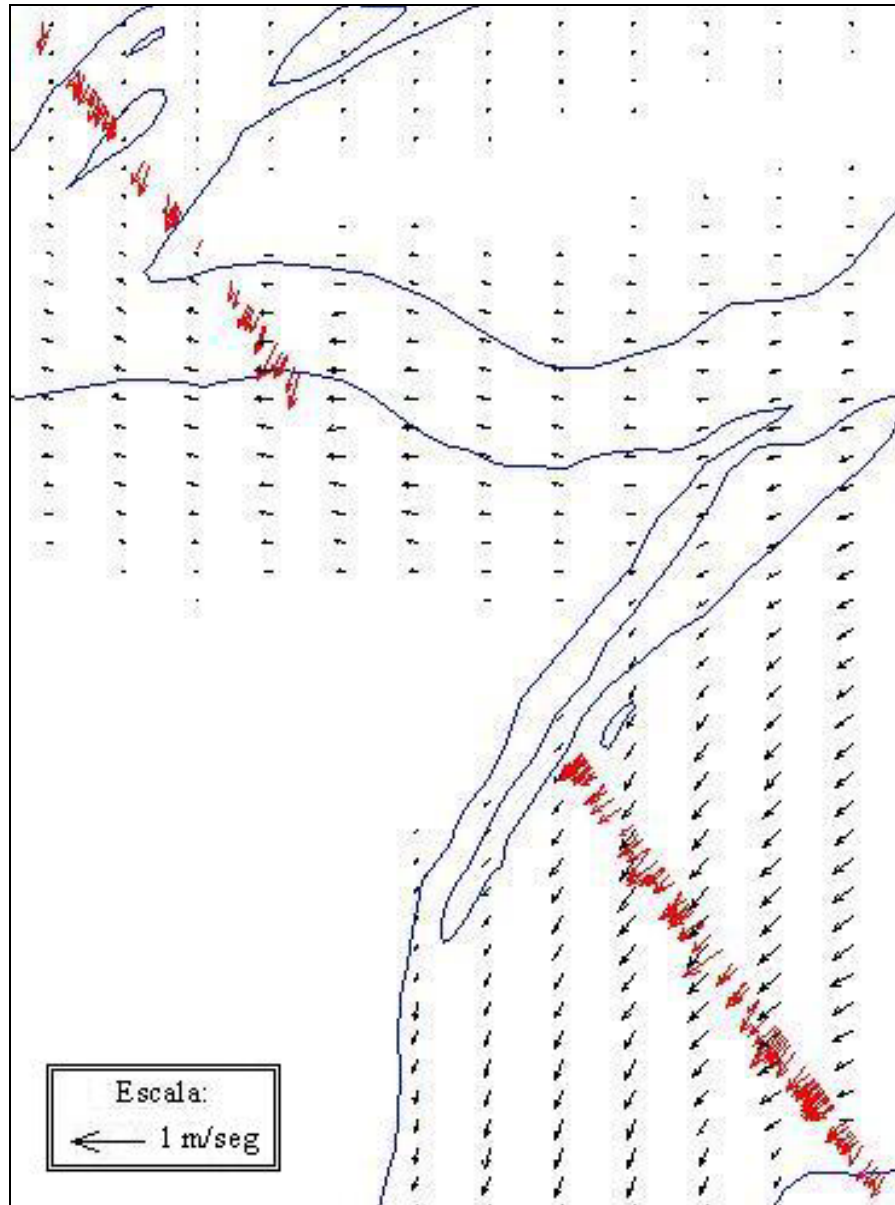
**Figura 2.2.6** Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 2 (E09)



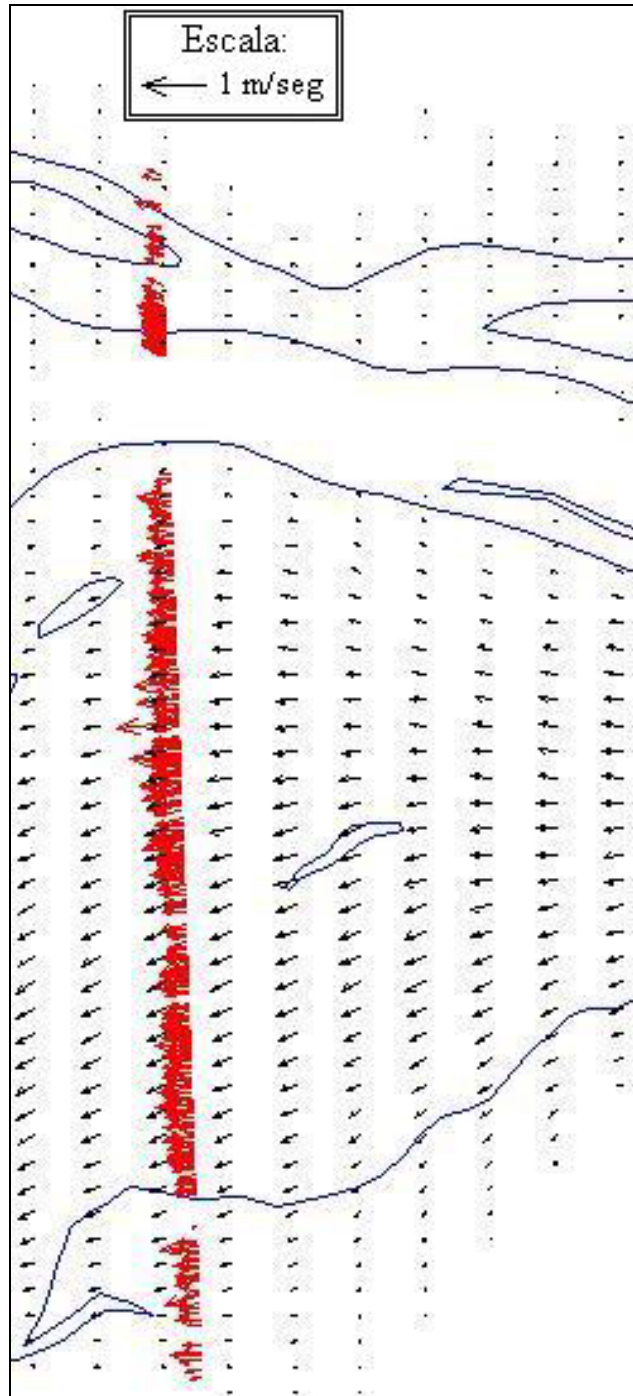
**Figura 2.2.7** Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 3 (E06)



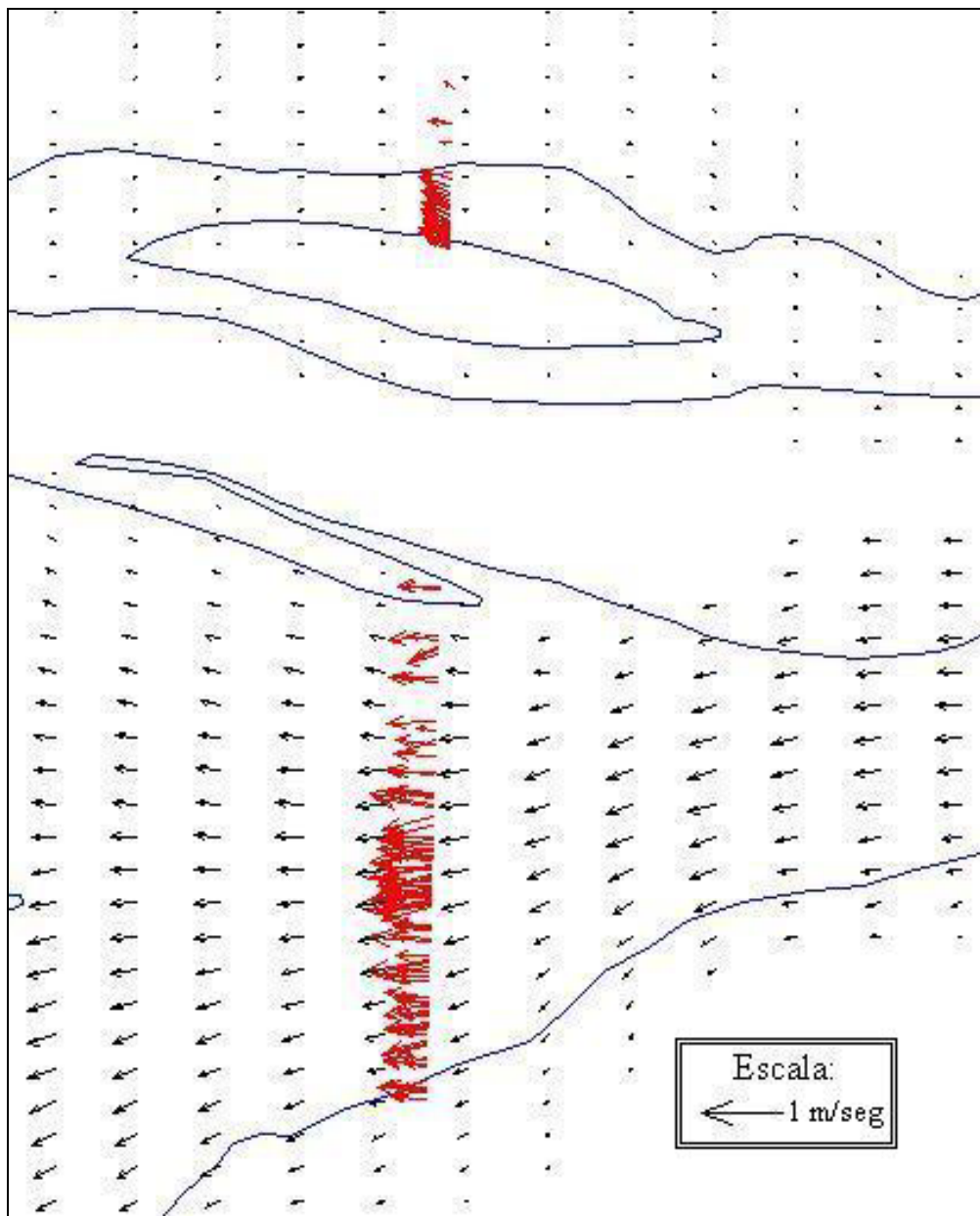
**Figura 2.2.8** Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 4 (E06)



**Figura 2.2.9** Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 5 (E07)



**Figura 2.2.10** Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 6 (E07)



*Figura 2.2.11* Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 7 (E08)

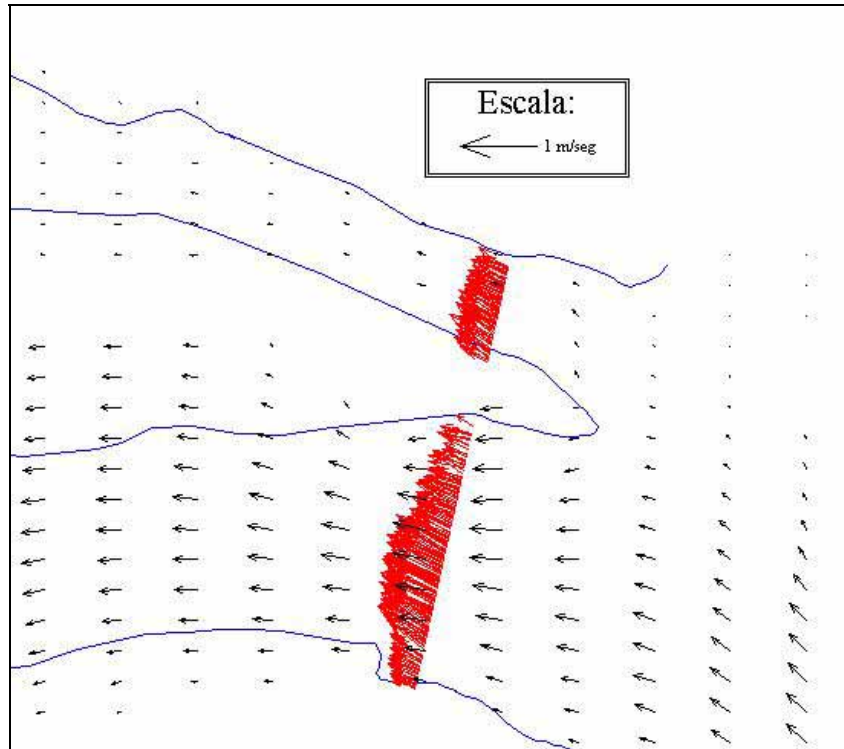


Figura 2.2.12 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 8 (E08)

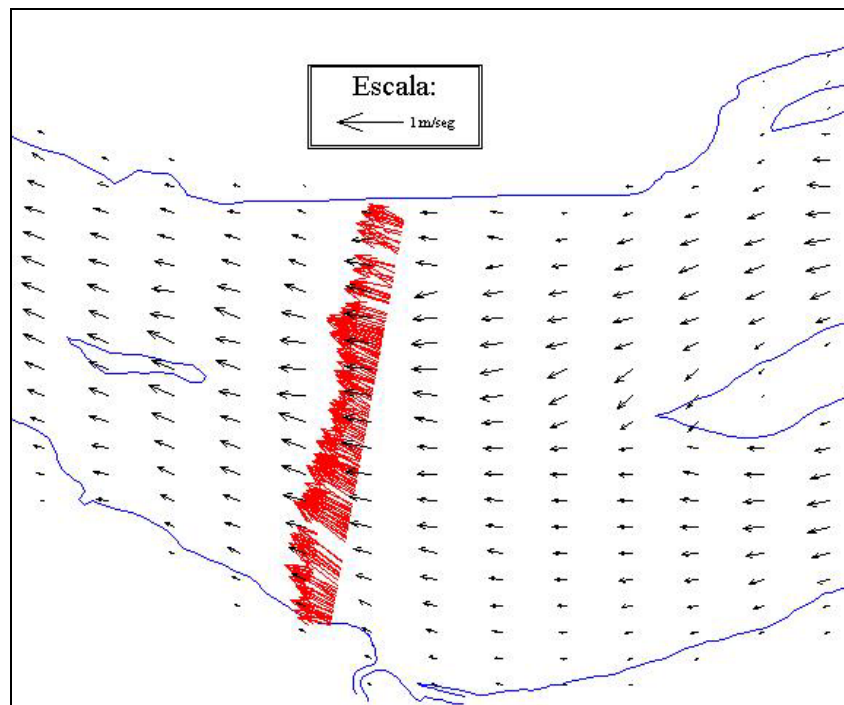


Figura 2.2.13 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 9 (E08)

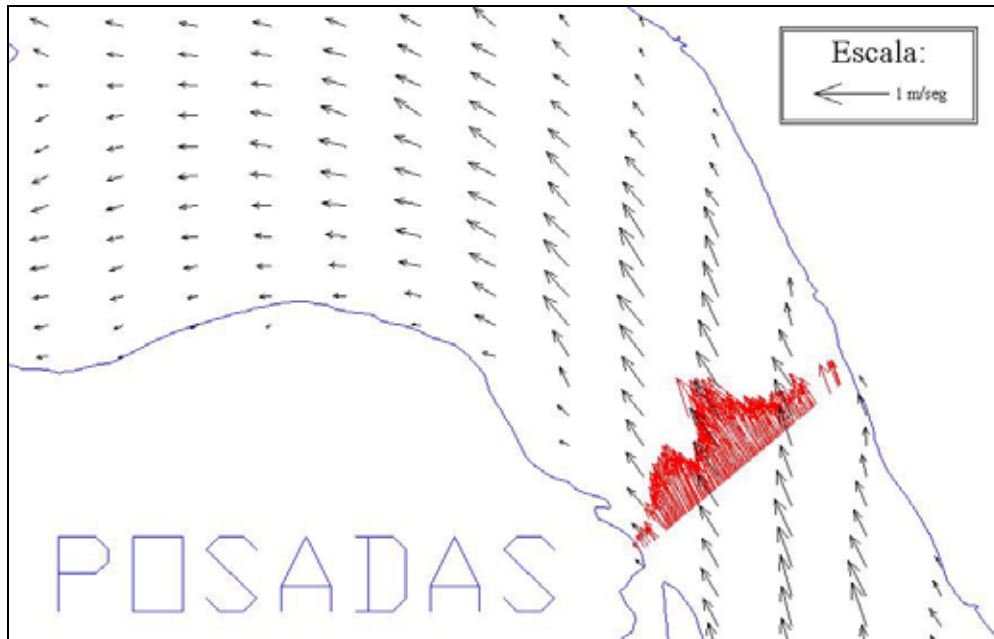


Figura 2.2.14 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 10 (E05)

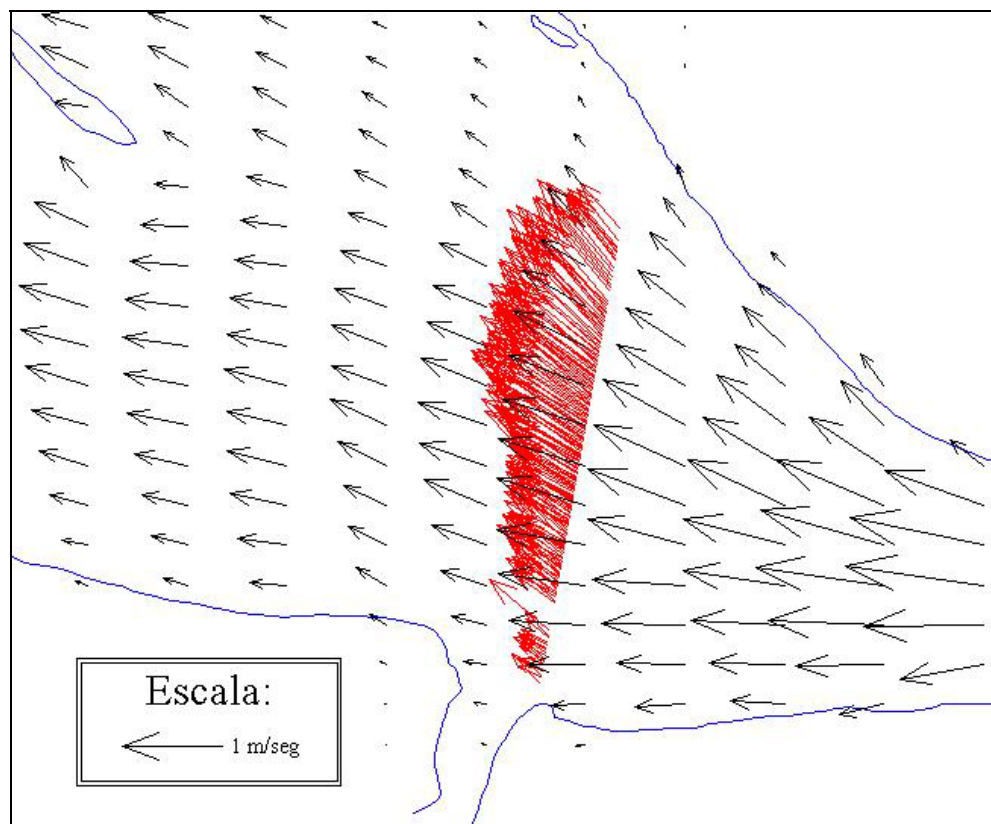
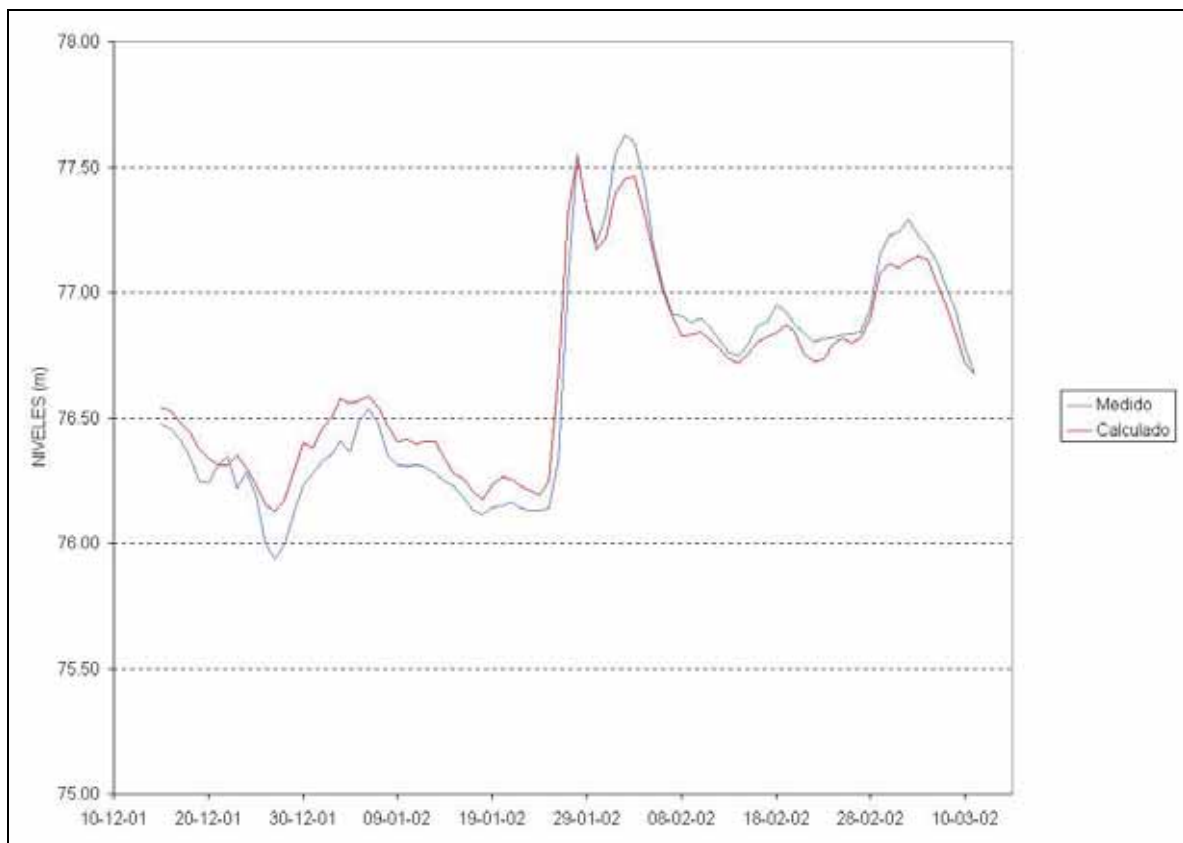


Figura 2.2.15 Perfiles de velocidades medidos y calculados en el Corte 11 (E05)

### 2.2.3 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 2.2.16 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 2.2.16 Comparación de niveles medidos y calculados en Posadas*

## 2.3 EXPLOTACIÓN

### 2.3.1 DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDADES

Luego de tener el modelo calibrado satisfactoriamente, se plantearon 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 2.3.1 se indican las características de los escenarios para los cuales se efectuaron ensayos con el modelo ajustado.

**Tabla 2.3.1** Escenarios de ensayo

Escenario	Caudal Ingresante (m <sup>3</sup> /s)	Caudal BAC (m <sup>3</sup> /s)	Nivel BP (m)
<i>E08a</i>	10.000	1.500	76,0
<i>E08b</i>	10.000	1.500	83,0
<i>E09a</i>	15.000	1.500	76,0
<i>E09b</i>	15.000	1.500	83,0
<i>E10a</i>	20.000	7.000	76,0
<i>E10b</i>	20.000	7.000	83,0
<i>E11a</i>	30.000	10.000	76,0
<i>E11b</i>	30.000	10.000	83,0
<i>E12a</i>	40.000	10.000	76,0
<i>E12b</i>	40.000	10.000	83,0

En las figuras 2.3.1 a 2.3.10 se presentan las zonas de isovelocidad para todos los escenarios ensayados con el modelo. 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.

Comparando la secuencia de figuras 2.3.1 a 2.3.5, todas correspondientes a cota 76 m, se observa 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).

Para cota 83 m (figuras 2.3.6 a 2.3.10) 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.

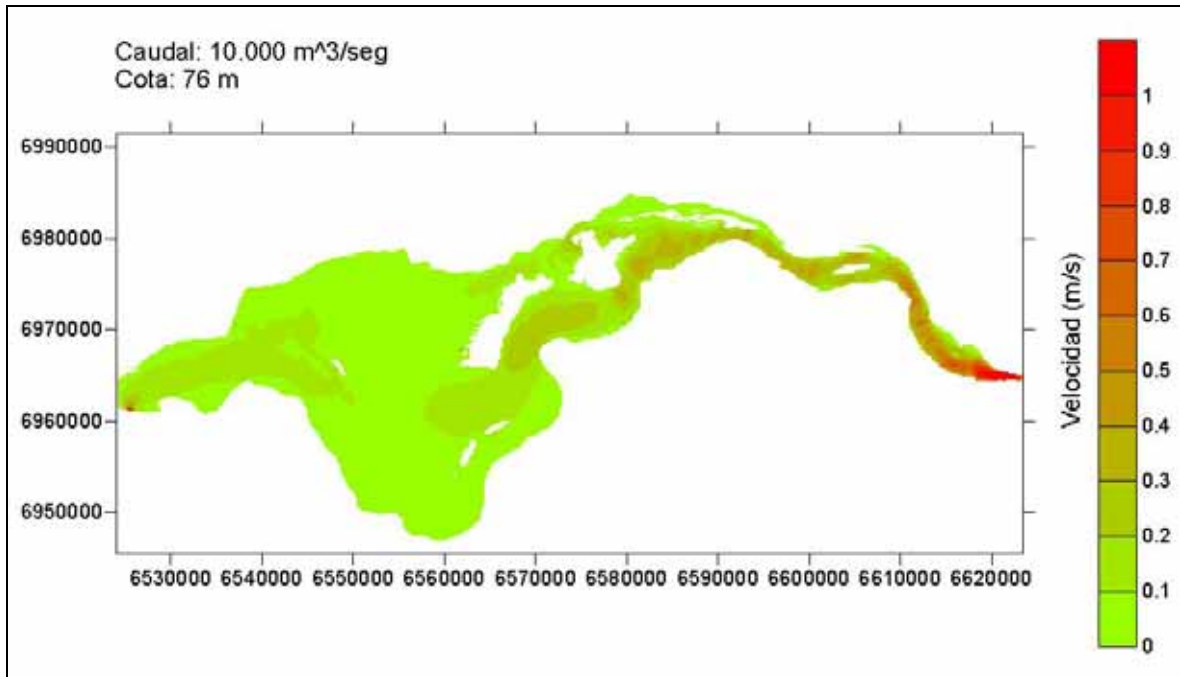


Figura 2.3.1 Zonas de isovelocidades para escenario E08a

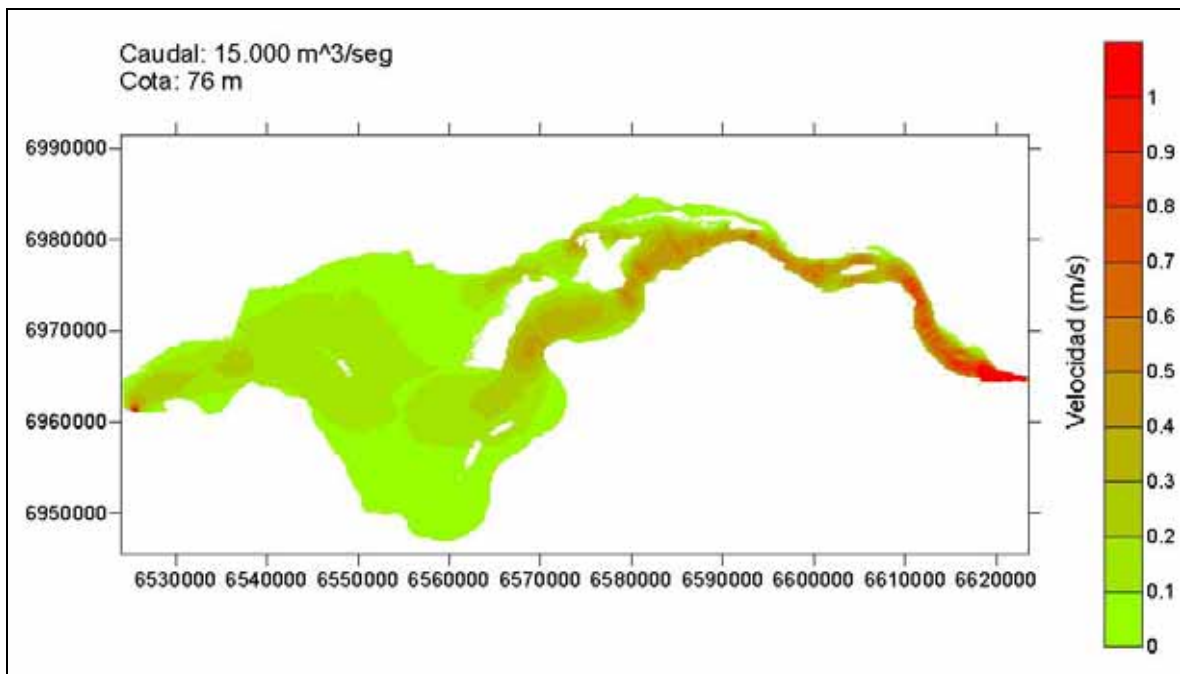


Figura 2.3.2 Zonas de isovelocidades para escenario E09a

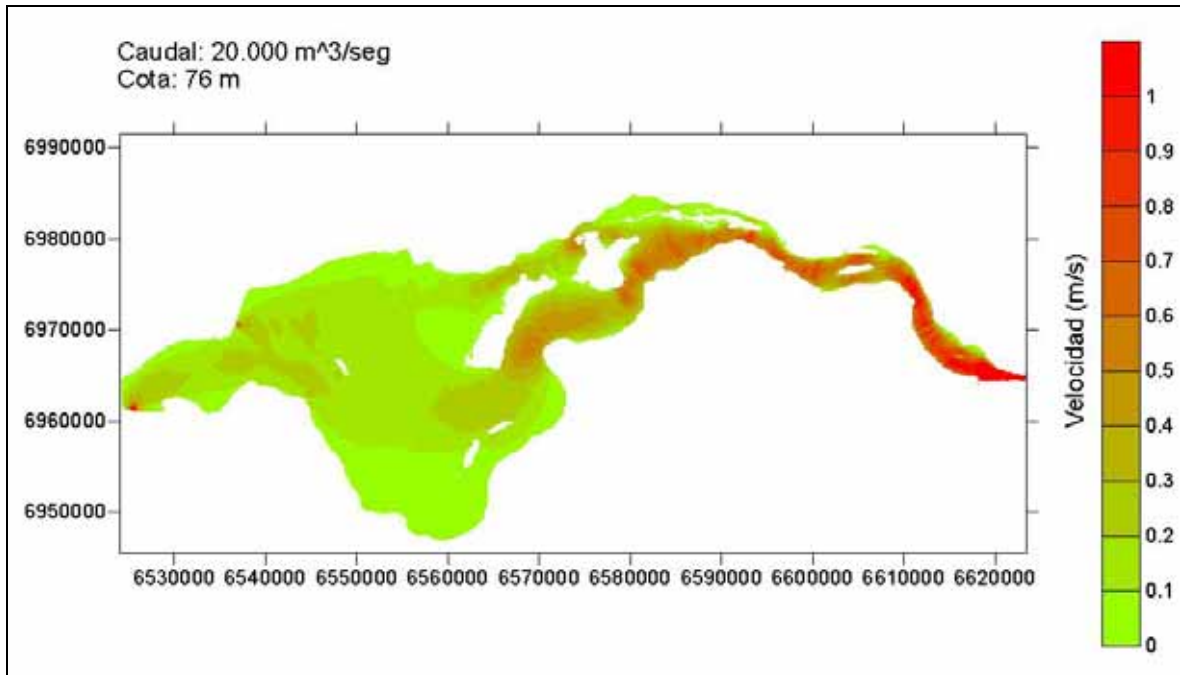


Figura 2.3.3 Zonas de isovelocidades para escenario E10a

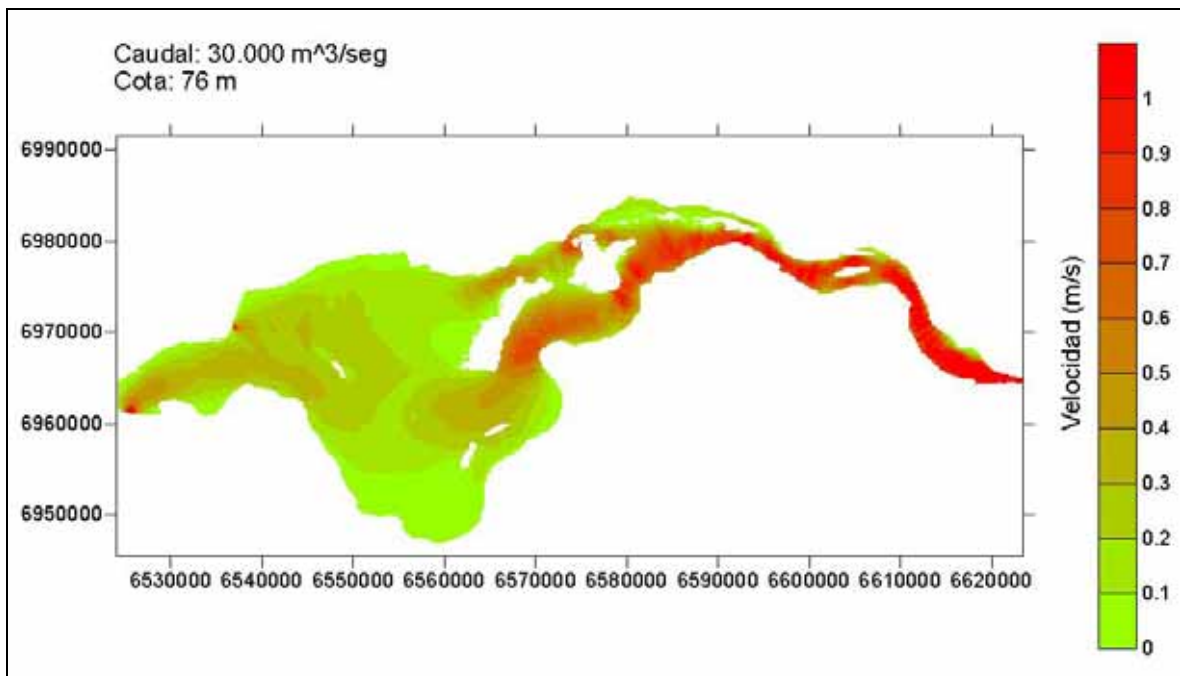


Figura 2.3.4 Zonas de isovelocidades para escenario E11a

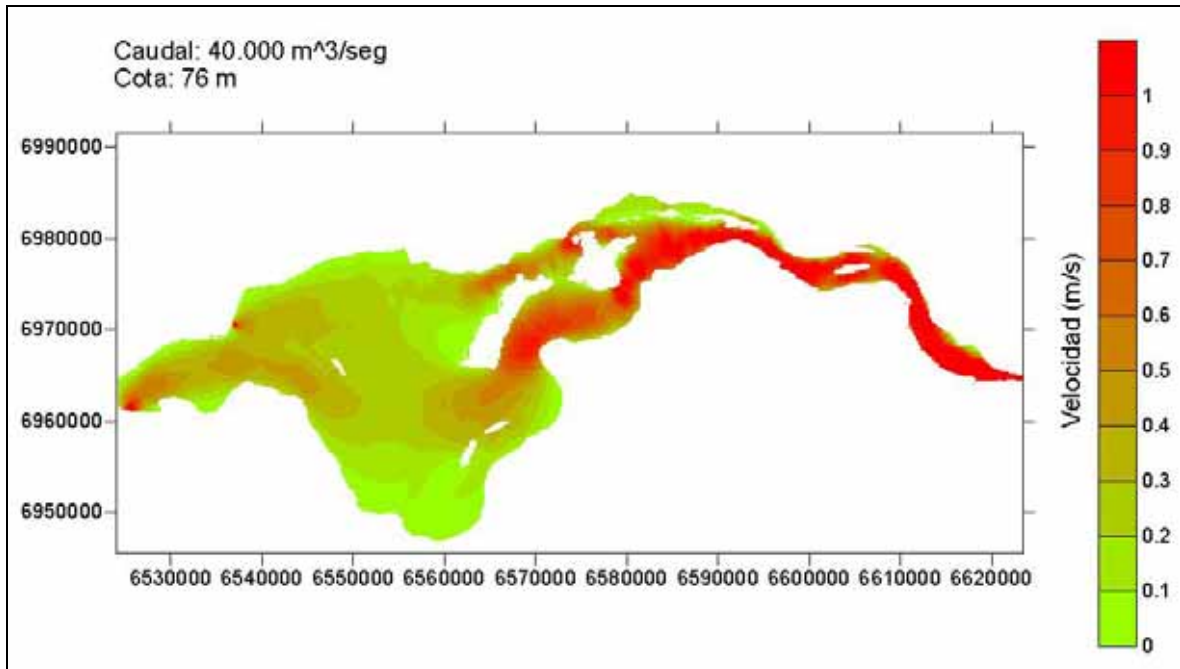


Figura 2.3.5 Zonas de isovelocidades para escenario E12a

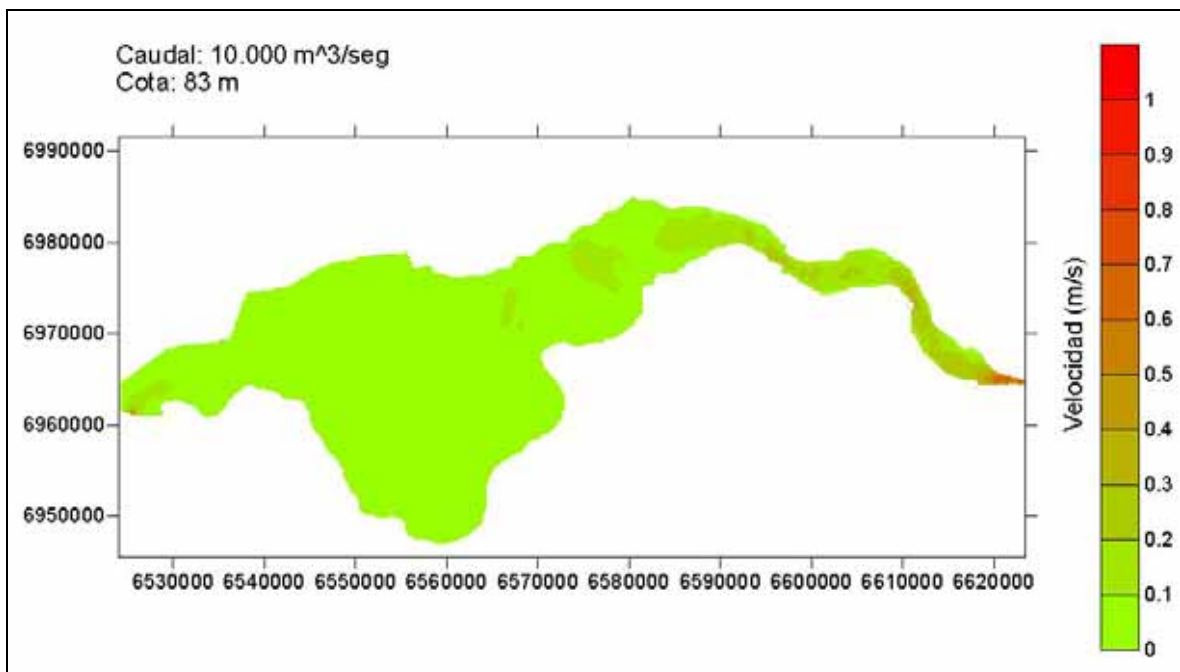


Figura 2.3.6 Zonas de isovelocidades para escenario E08b

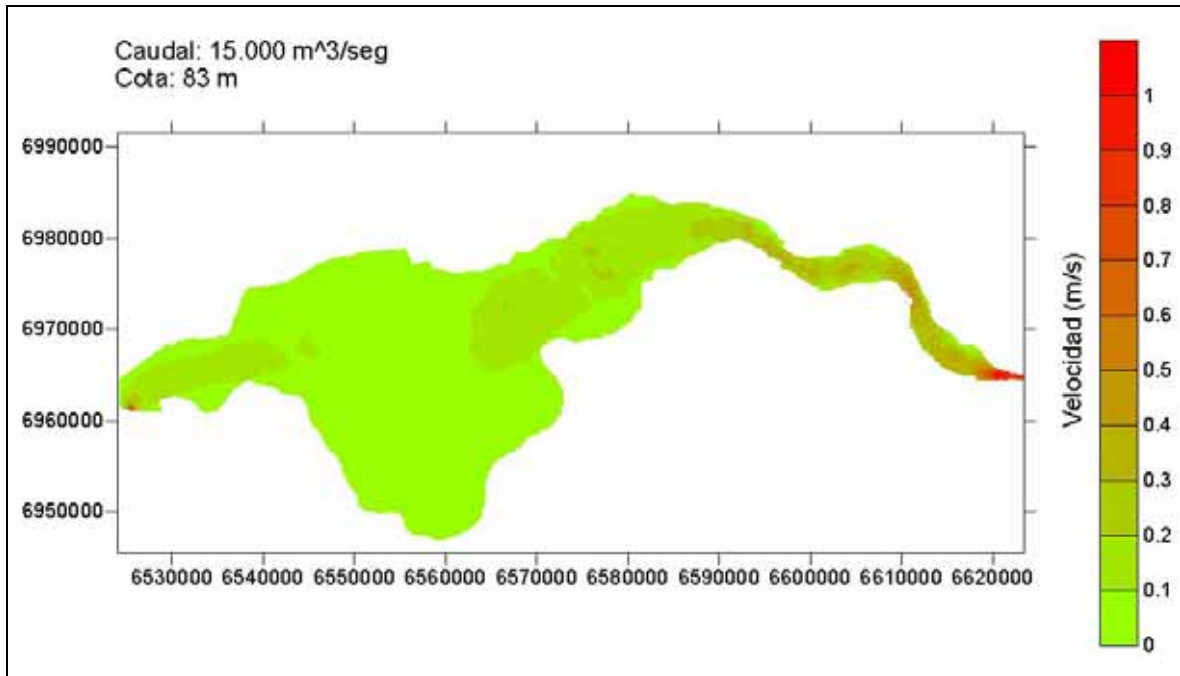


Figura 2.3.7 Zonas de isovelocidades para escenario E09b

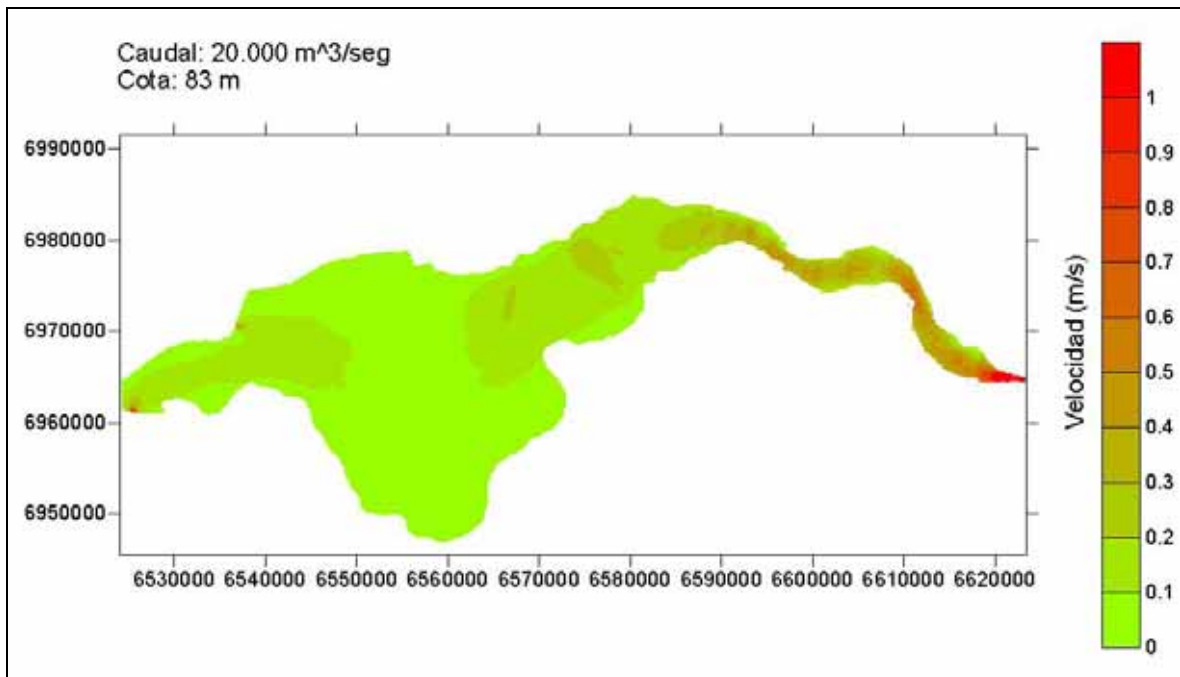


Figura 2.3.8 Zonas de isovelocidades para escenario E10b

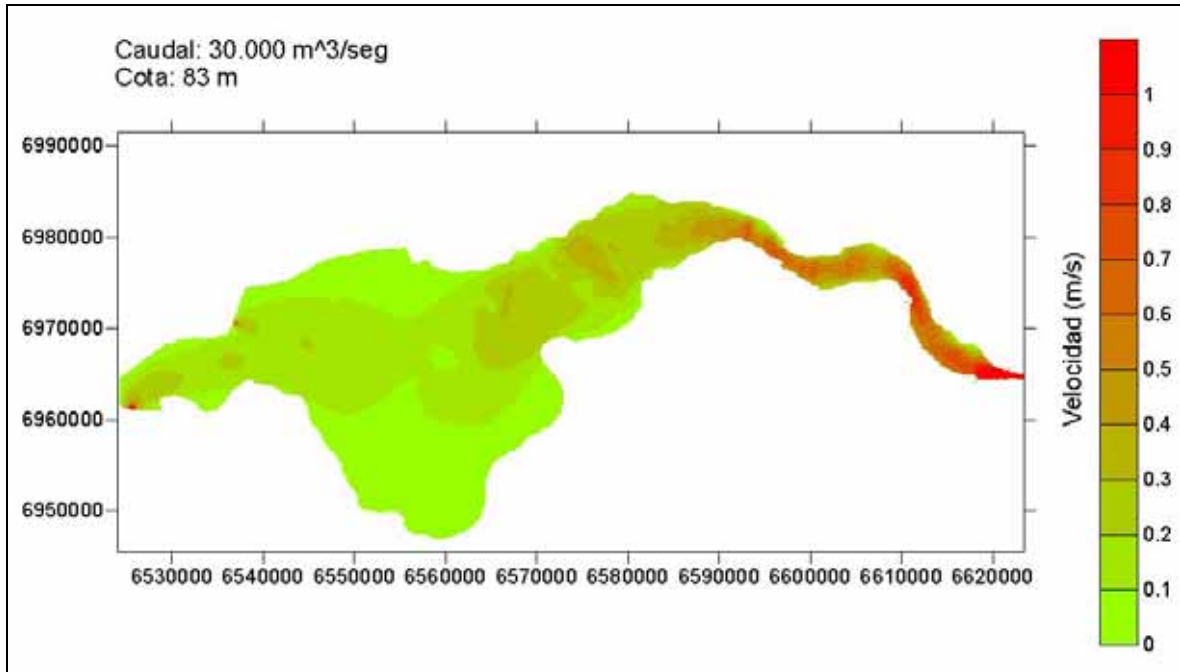


Figura 2.3.9 Zonas de isovelocidades para escenario E11b

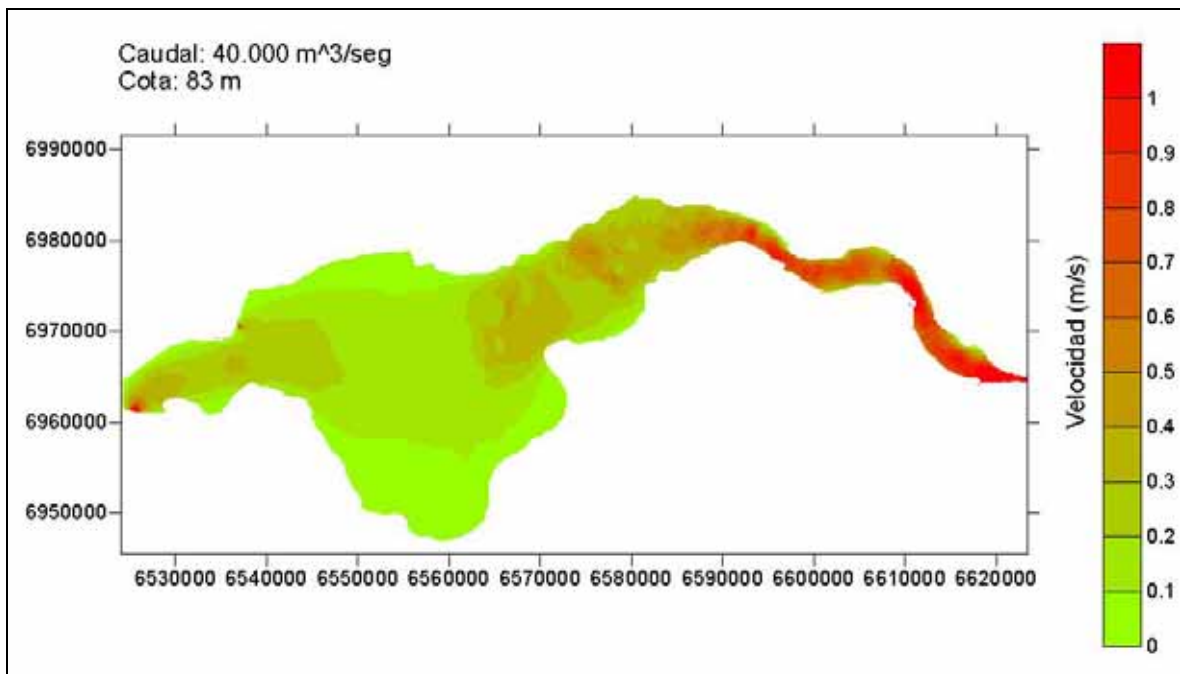
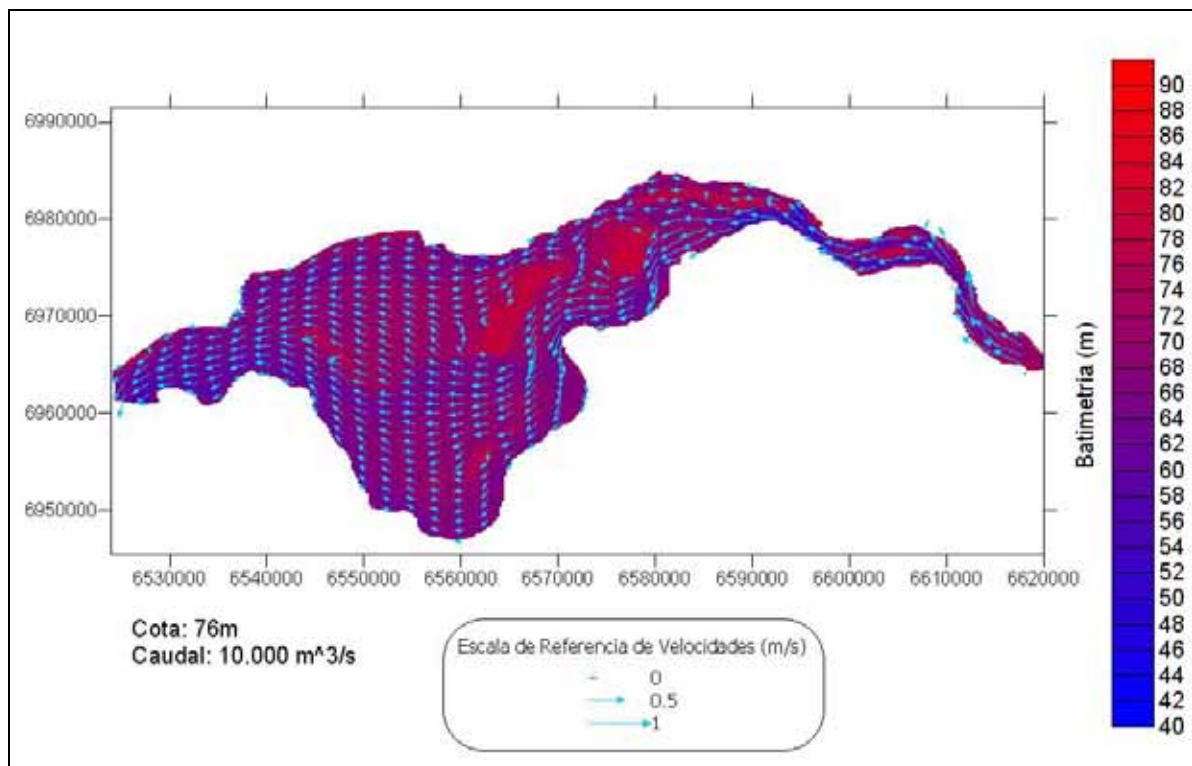


Figura 2.3.10 Zonas de isovelocidades para escenario E12b

Las figuras 2.3.11 a 2.3.20 presentan los campos de velocidades correspondientes a los distintos escenarios. Para los escenarios asociados a cota 76m (figuras 2.3.11 a 2.3.15) se distinguen claramente, en función de la magnitud decreciente de la velocidad, las tres zonas identificadas en estudios previos: la zona fluvial, entre al arroyo Garupá y la primera expansión, la zona de transición, hasta la segunda expansión, la cual incluye islas de dimensión significativa, y la zona propiamente lacustre. El principal condicionamiento de las direcciones de flujo también muestra una variación longitudinal: de estar fuertemente condicionadas por las márgenes en la zona fluvial, pasan a estar esencialmente determinadas por la batimetría en la zona lacustre, salvo en la zona de descarga (central y vertederos).

En el caso de los escenarios a cota 83 m (figuras 2.3.16 a 2.3.20) se siguen distinguiendo las tres zonas, en función de la magnitud de la velocidad, pero las diferencias absolutas son más débiles debido a la amortiguación general de las corrientes producida por el aumento del nivel.



**Figura 2.3.11** Campo de velocidades para el escenario E08a

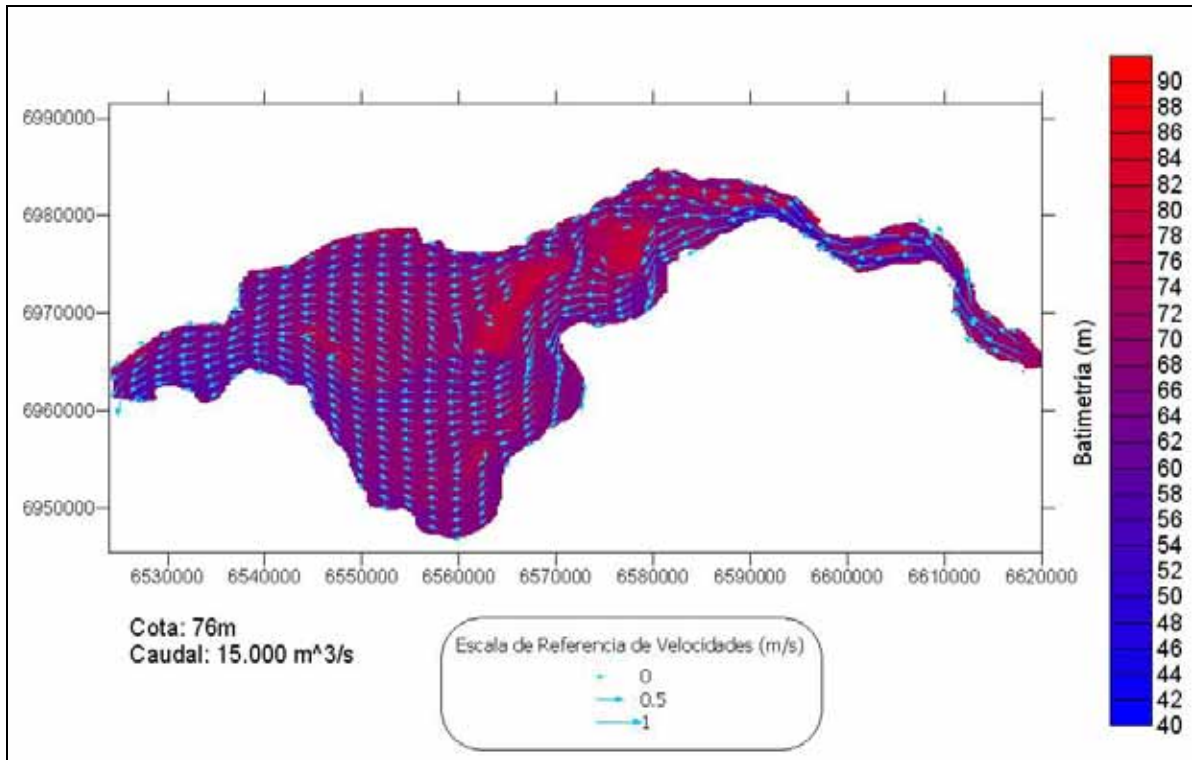


Figura 2.3.12 Campo de velocidades para el escenario E09a

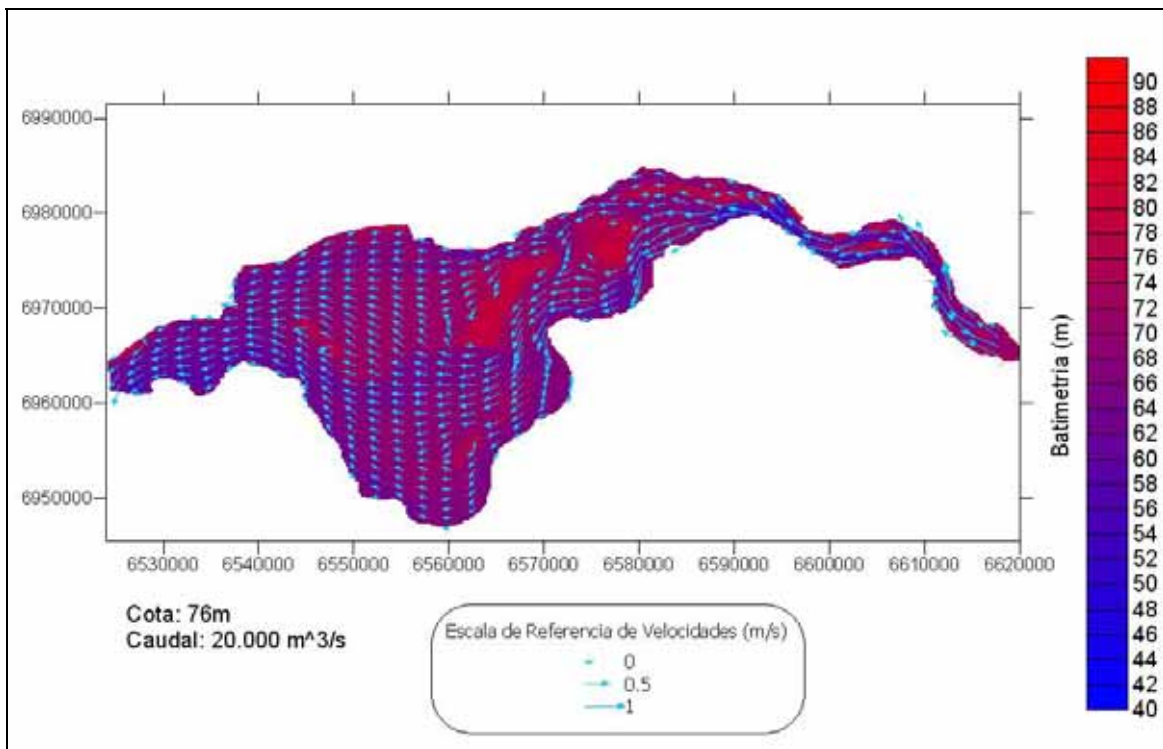


Figura 2.3.13 Campo de velocidades para el escenario E10a

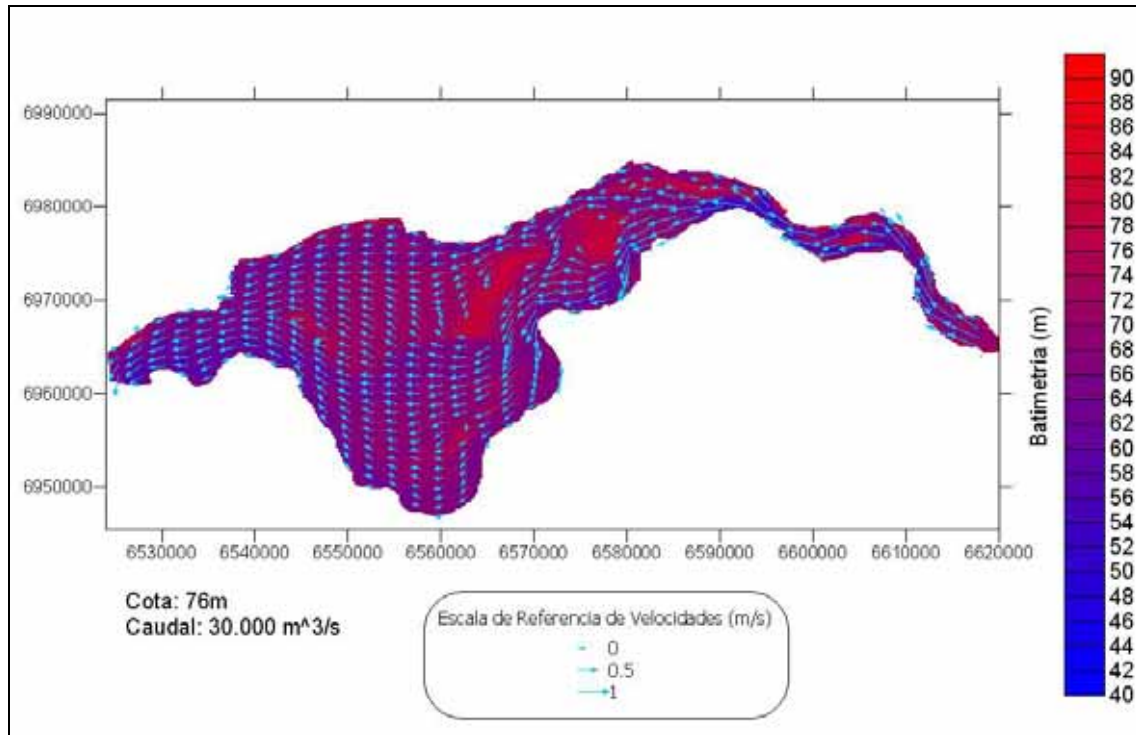


Figura 2.3.14 Campo de velocidades para el escenario E11a

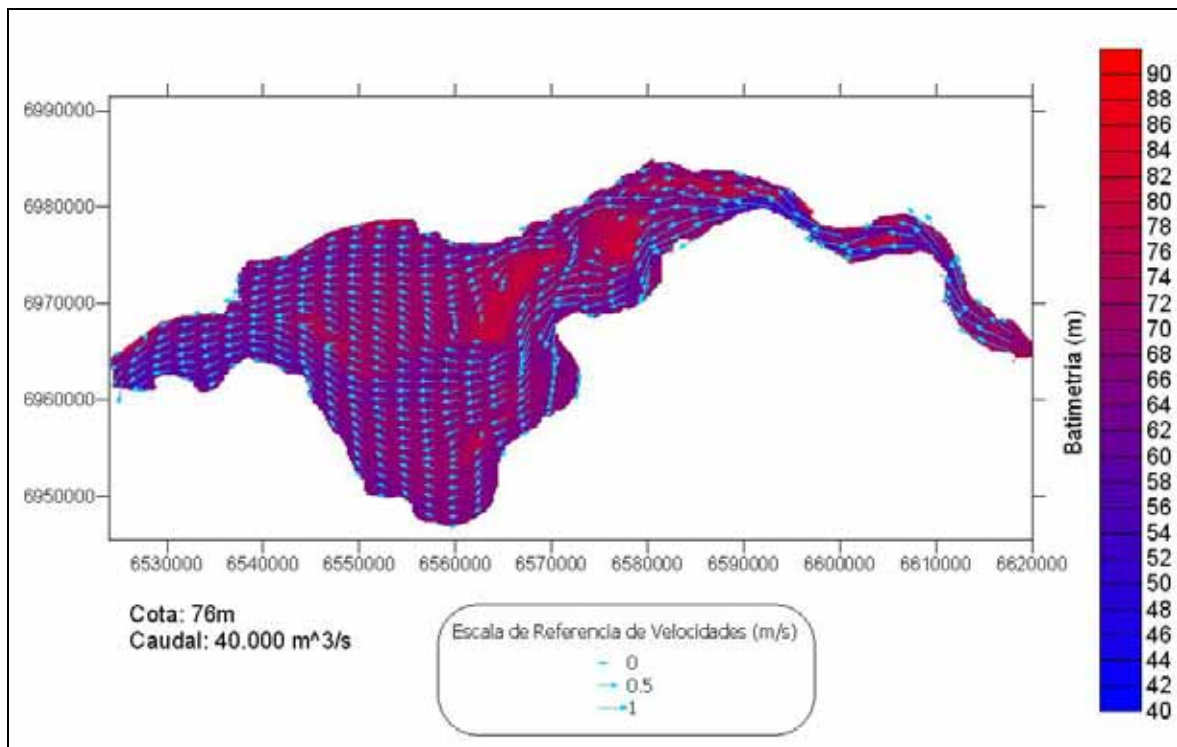


Figura 2.3.15 Campo de velocidades para el escenario E12a

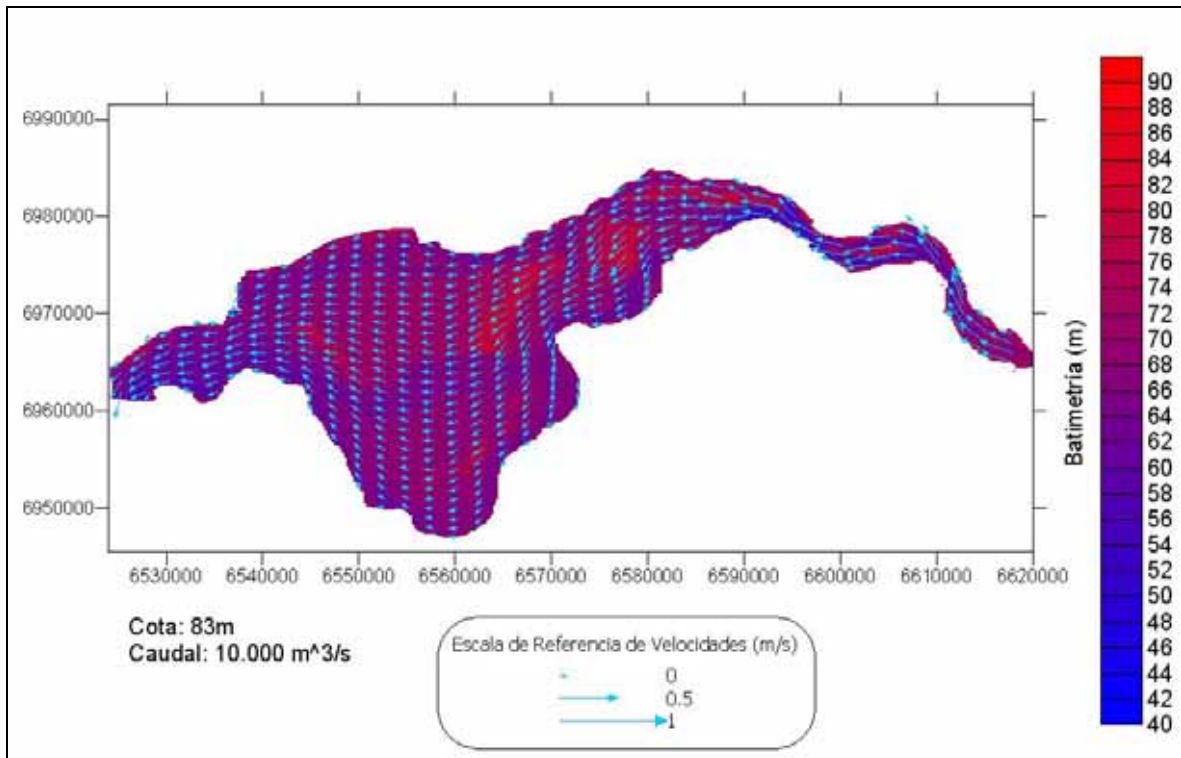


Figura 2.3.16 Campo de velocidades para el escenario E08b

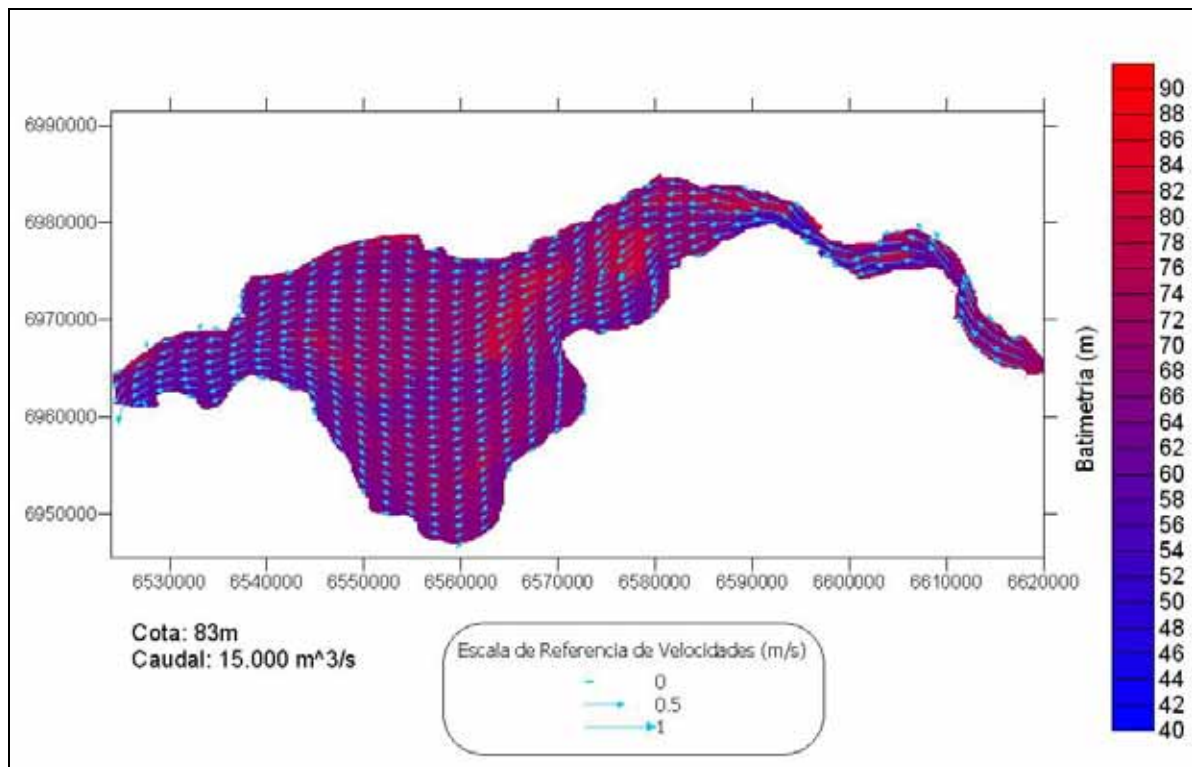


Figura 2.3.17 Campo de velocidades para el escenario E09b

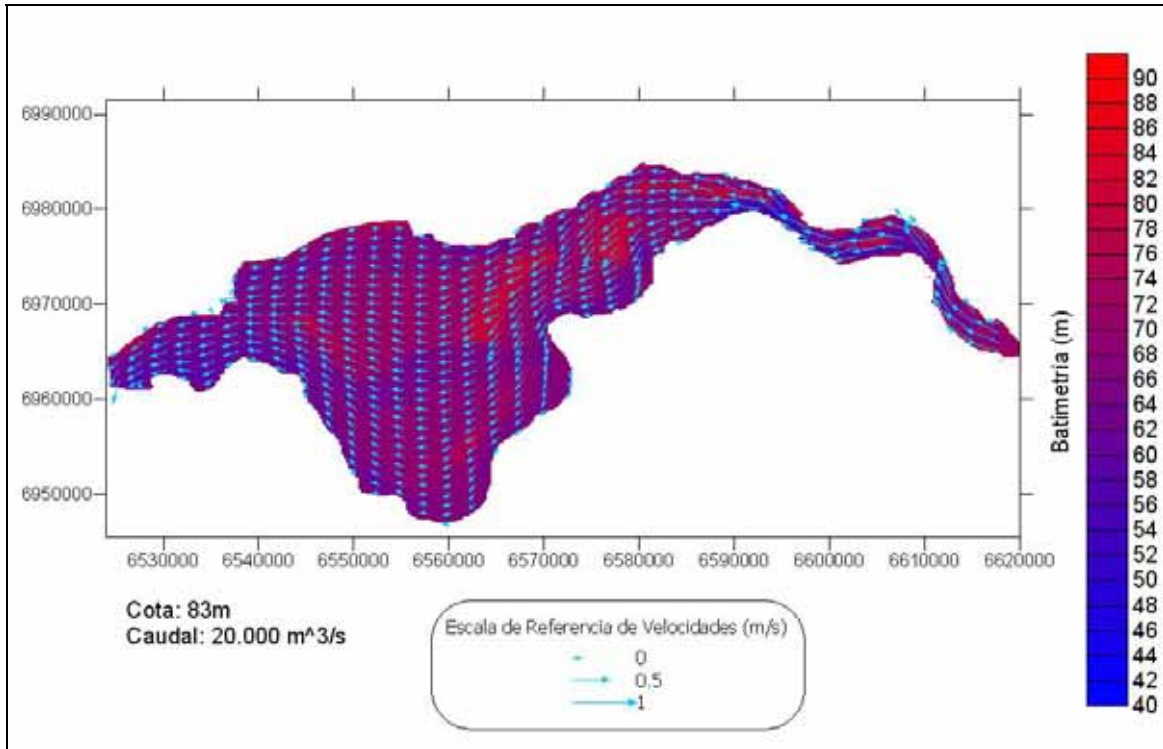


Figura 2.3.18 Campo de velocidades para el escenario E10b

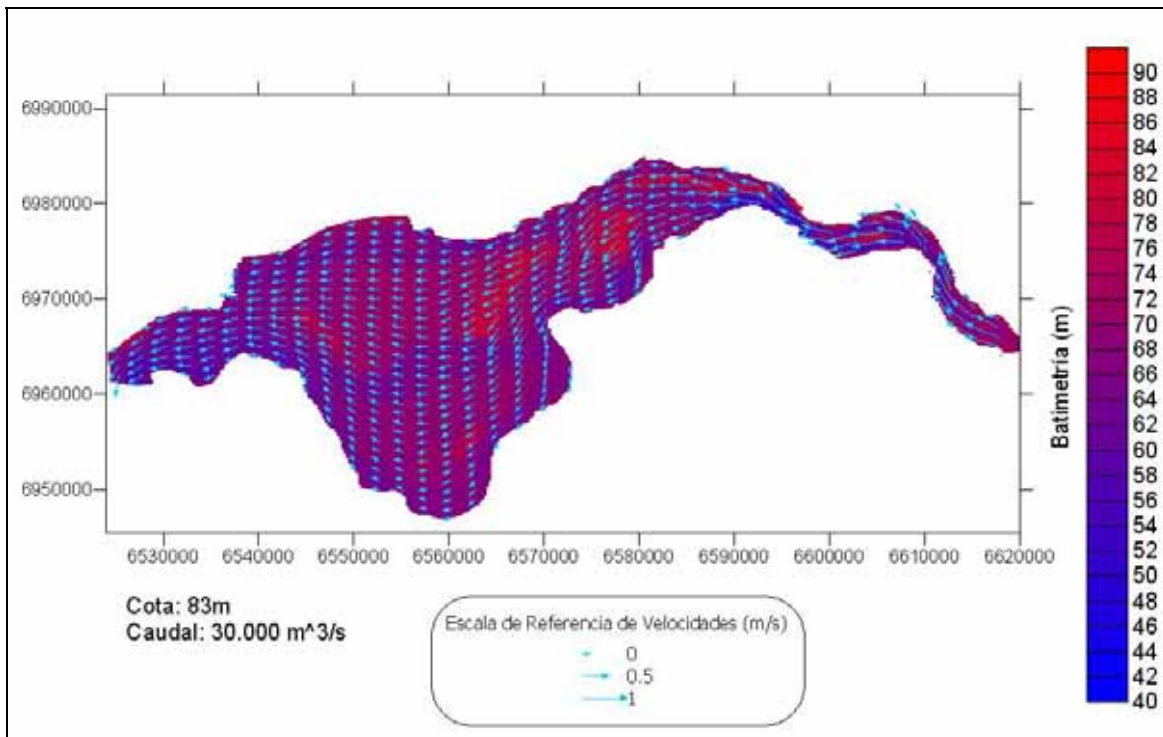


Figura 2.3.19 Campo de velocidades para el escenario E11b

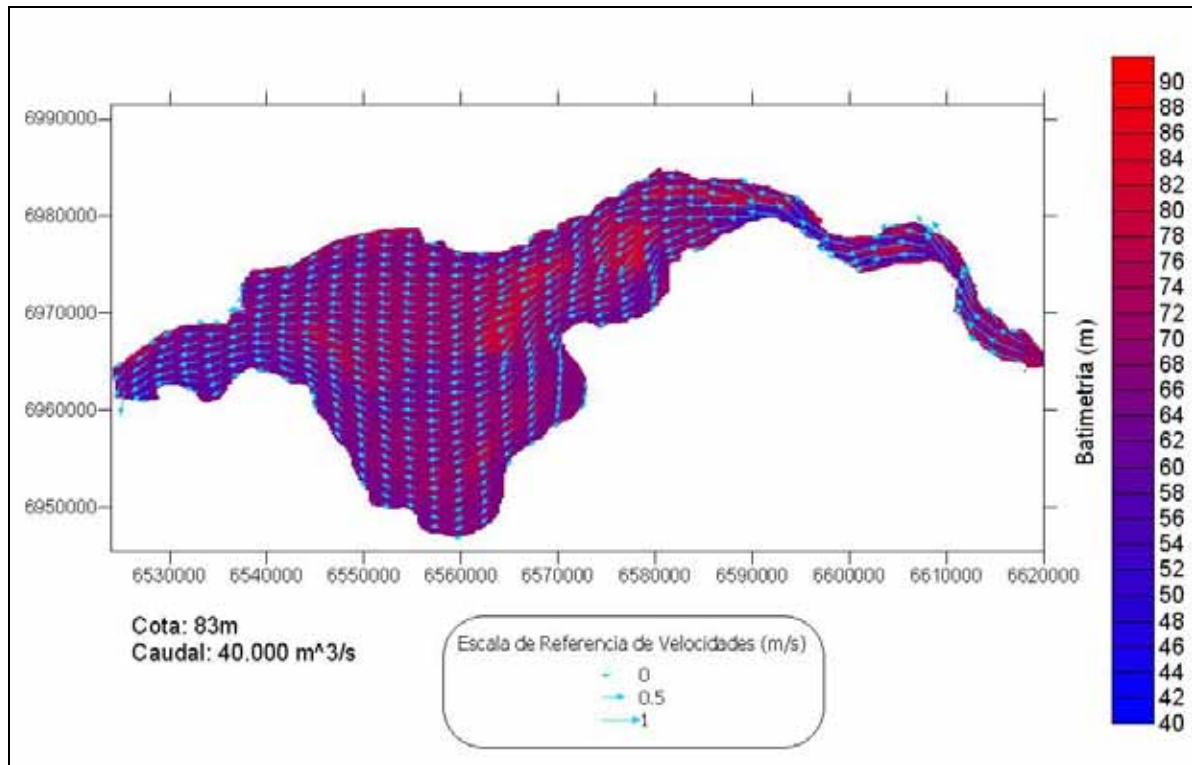
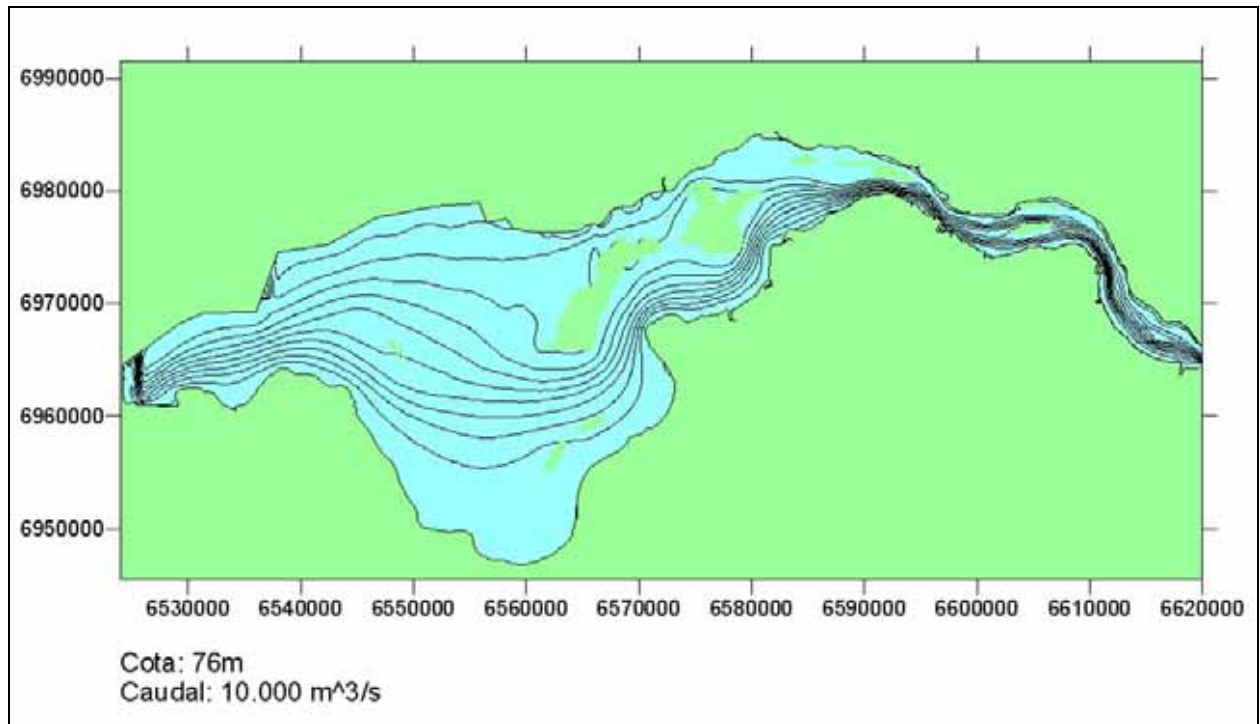


Figura 2.3.20 Campo de velocidades para el escenario E12b

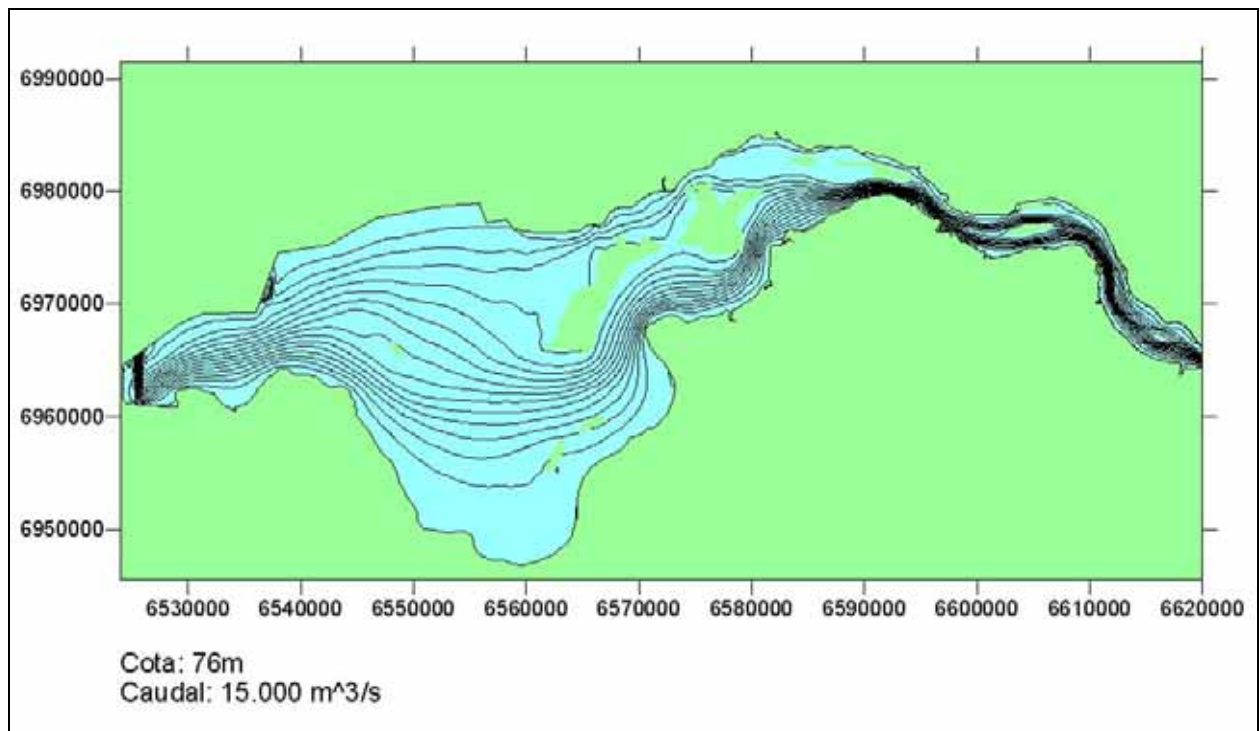
### 2.3.2 TUBOS DE FLUJO

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.

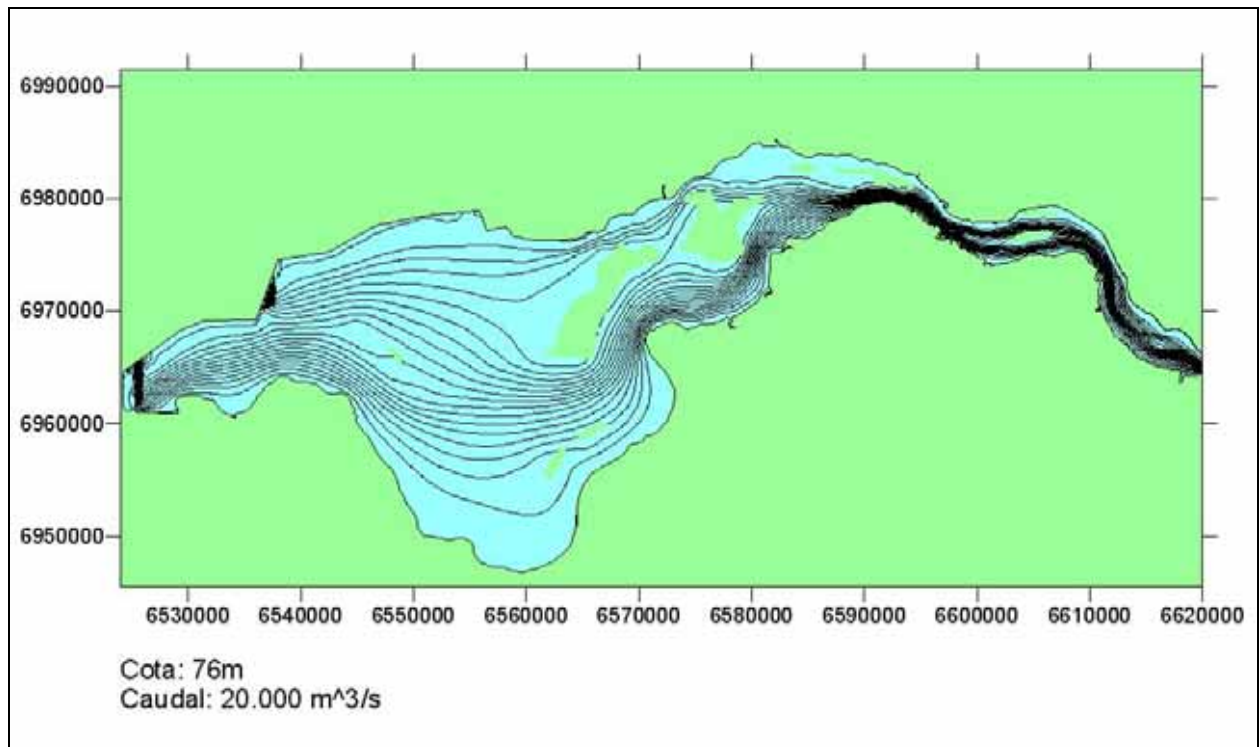
Las figuras 2.3.21 a 2.3.30 presentan los tubos de flujo de  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondientes a todos los escenarios de ensayo. Para cota 76 m (figuras 2.3.21 a 2.3.25) se distinguen claramente dos corredores principales de flujo, asociados a los cauces originales del río Paraná: brazo principal y Brazo Aña-Cuá, con preponderancia del transporte en el primero de ellos, como era de esperarse.



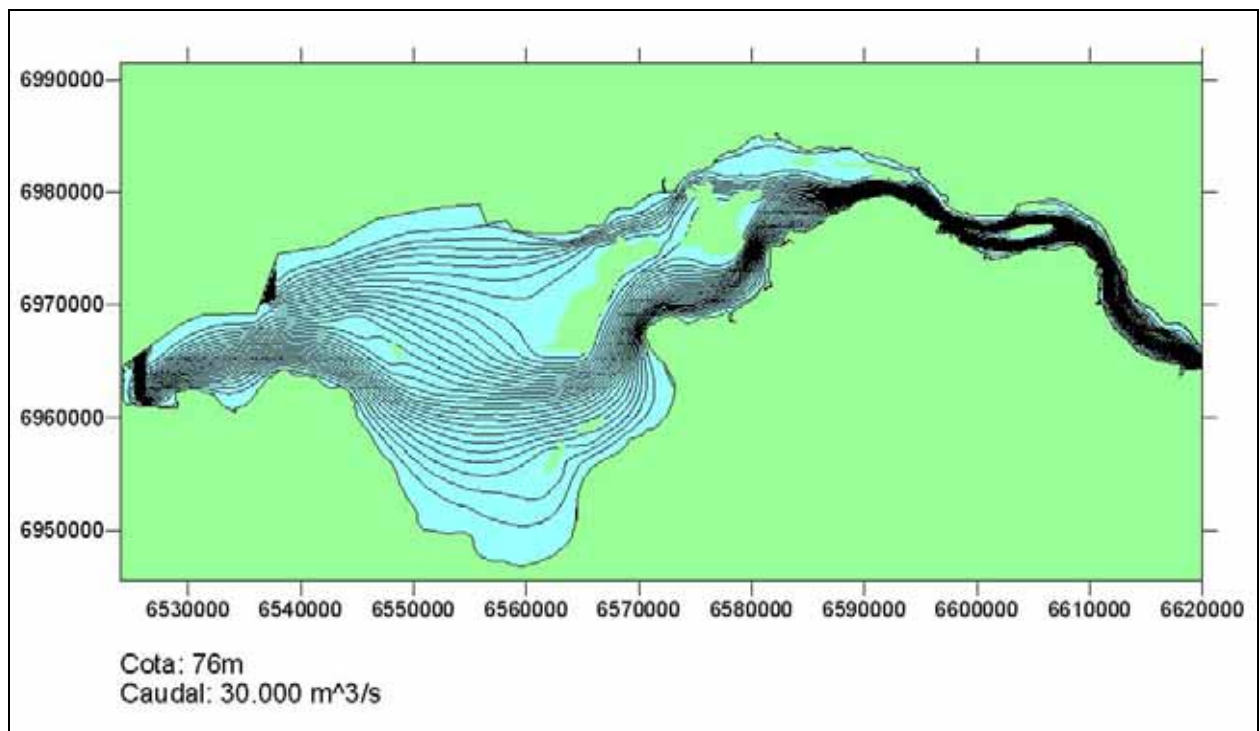
*Figura 2.3.21 Tubos de flujo de 1000 m<sup>3</sup>/s para el escenario E08a*



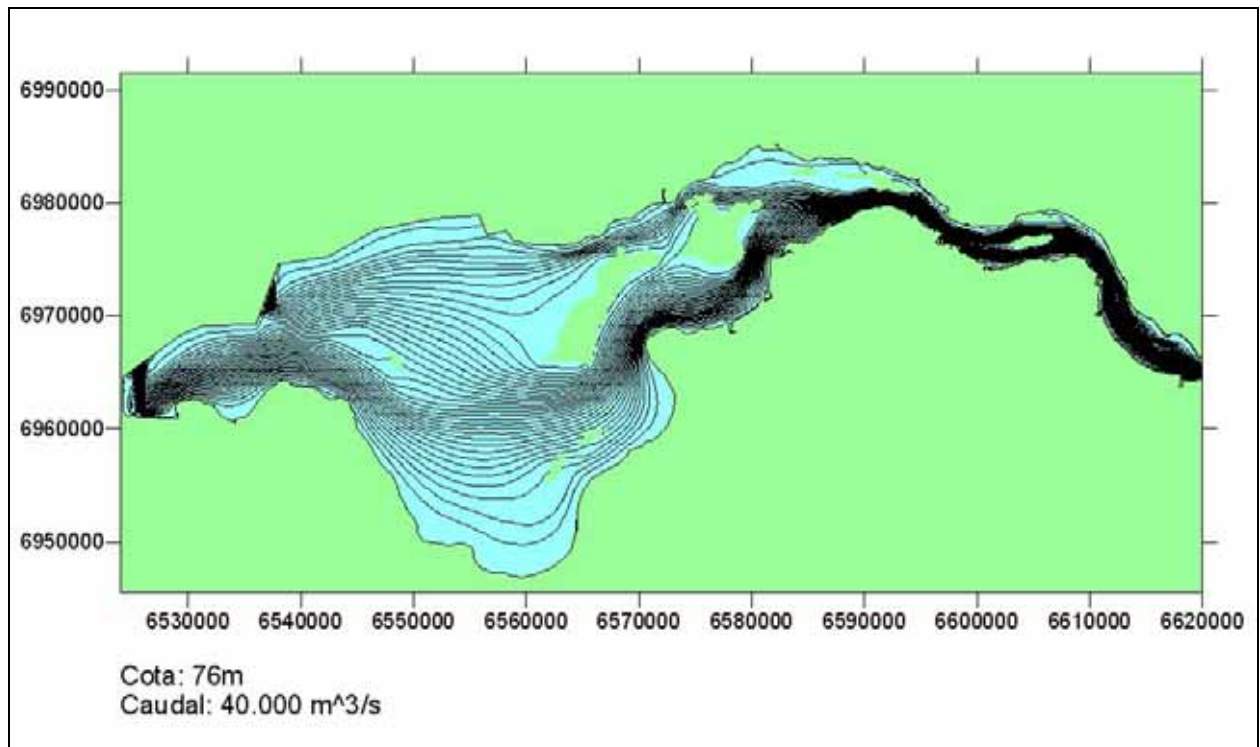
*Figura 2.3.22 Tubos de flujo de 1000 m<sup>3</sup>/s para el escenario E09a*



*Figura 2.3.23 Tubos de flujo de 1000 m<sup>3</sup>/s para el escenario E10a*

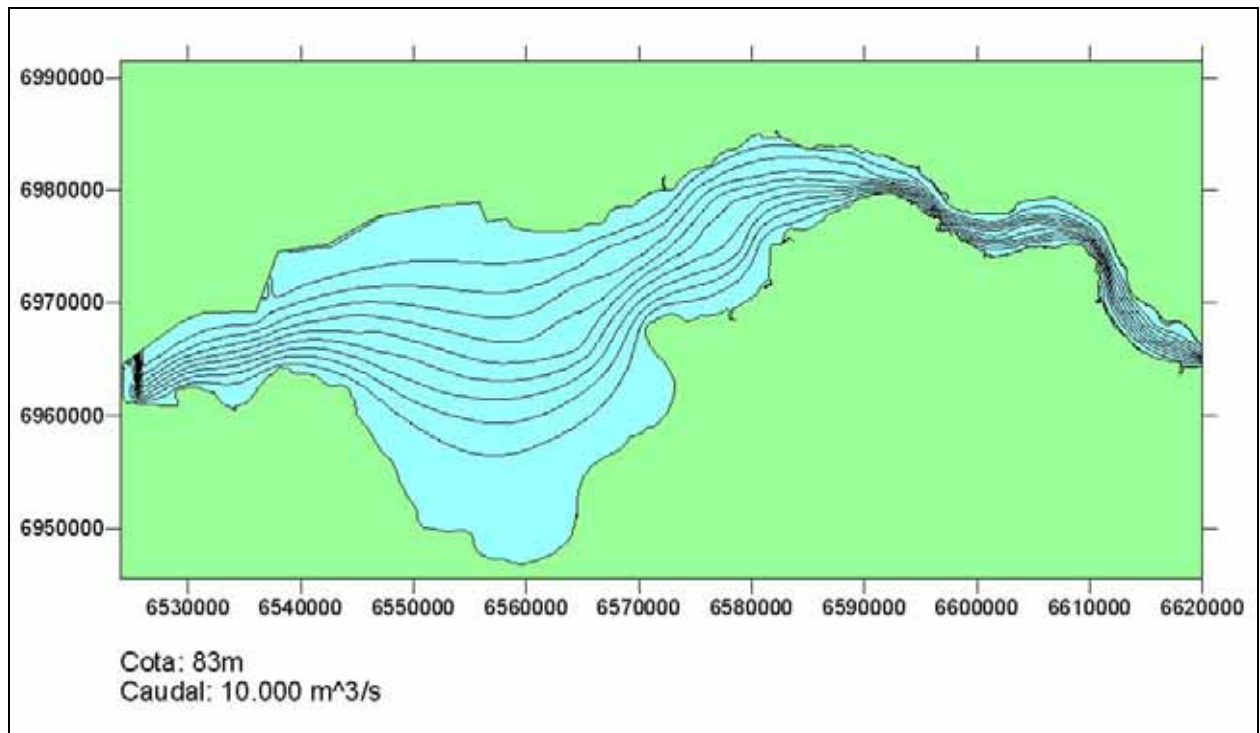


*Figura 2.3.24 Tubos de flujo de 1000 m<sup>3</sup>/s para el escenario E11a*

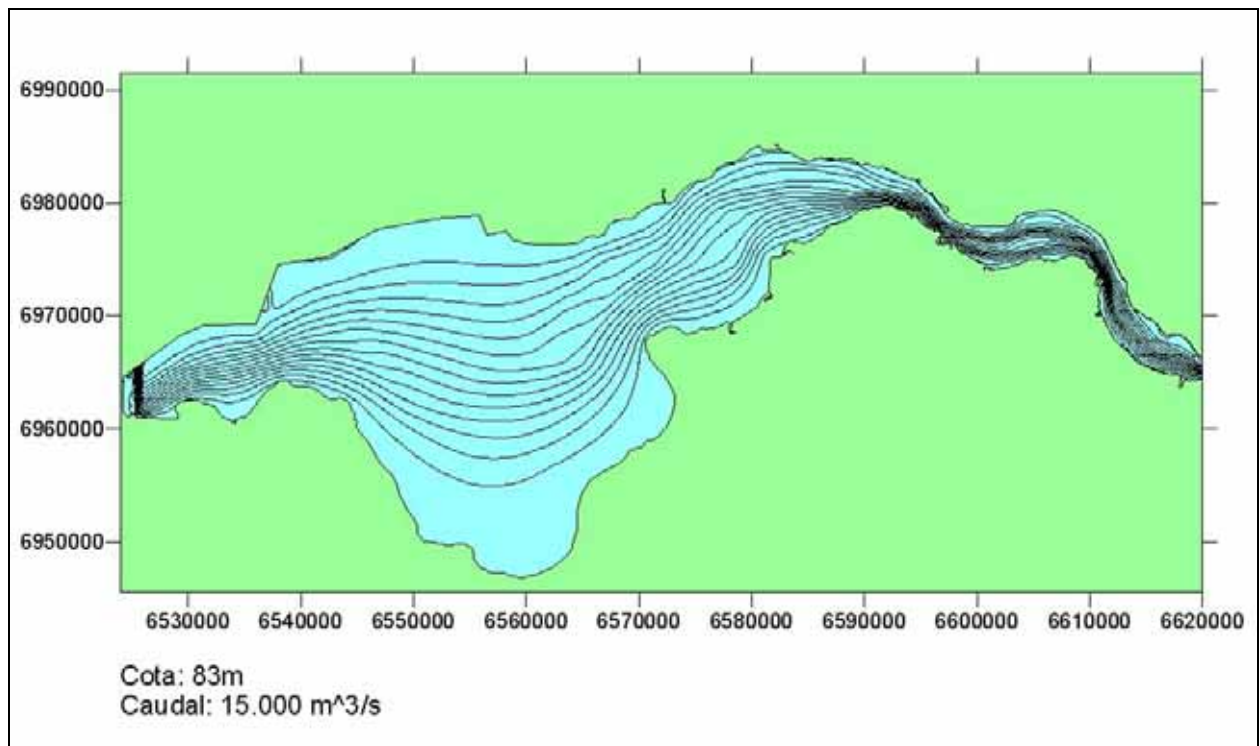


*Figura 2.3.25 Tubos de flujo de 1000 m<sup>3</sup>/s para el escenario E12a*

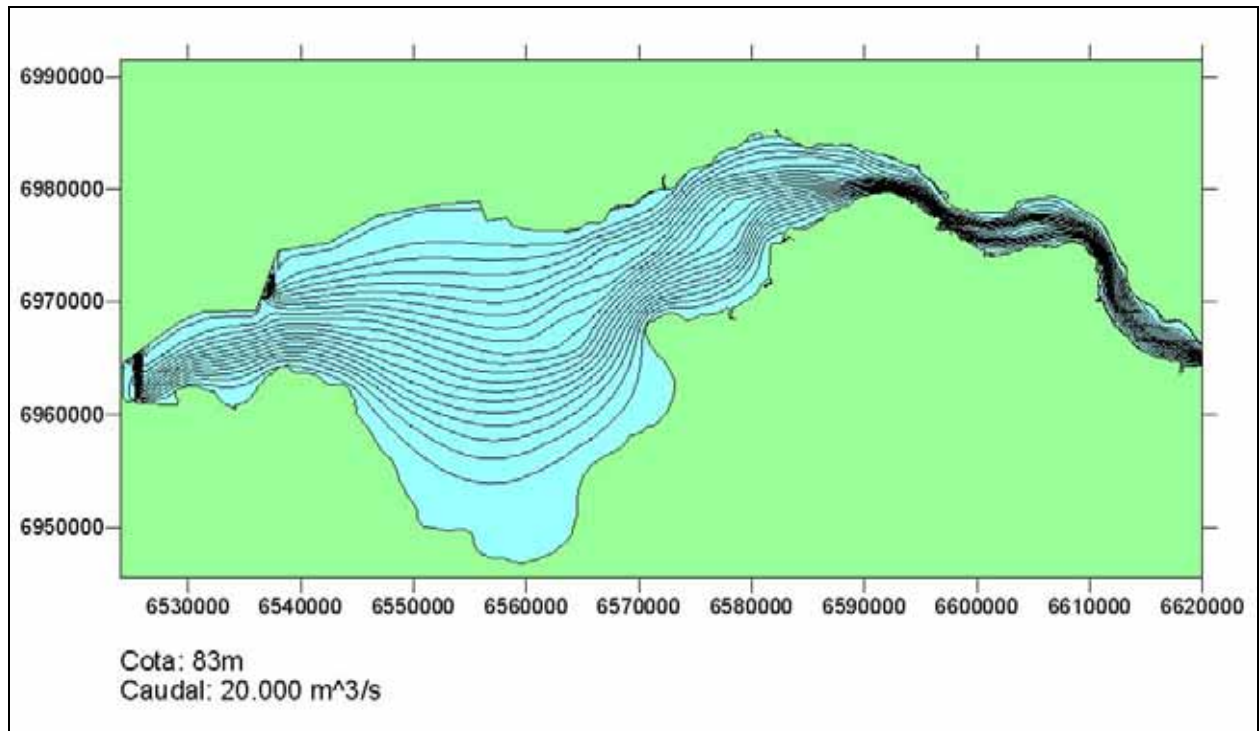
Las figuras 2.3.26 a 2.3.30 presentan los resultados correspondientes a cota 83 m. Se observa un cambio cualitativo respecto de la situación a cota 76 m, ya que ahora se distingue básicamente un solo corredor de flujo, centrado sobre el eje medio del embalse. Es de esperarse que este cambio produzca efectos significativos sobre el transporte y deposición de sedimentos y contaminantes en el embalse, en comparación con las situación actual a cota 76 m.



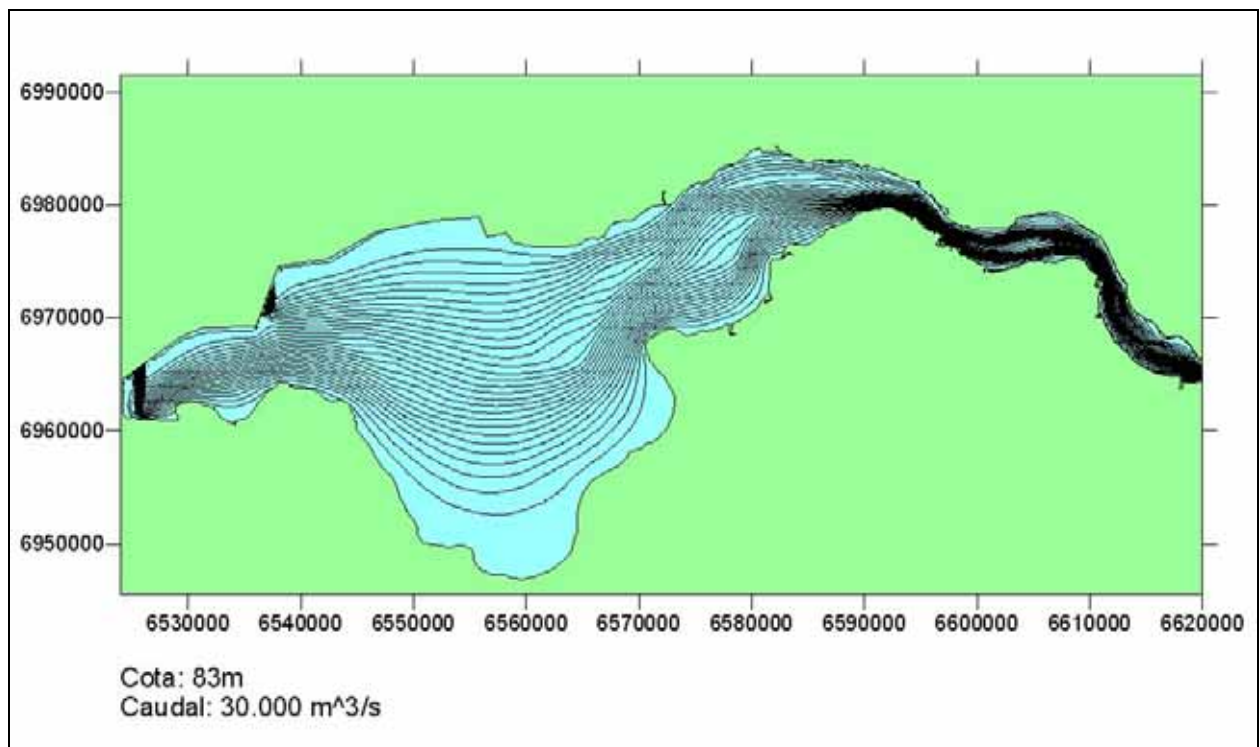
*Figura 2.3.26 Tubos de flujo de 1000 m³/s para el escenario E08b*



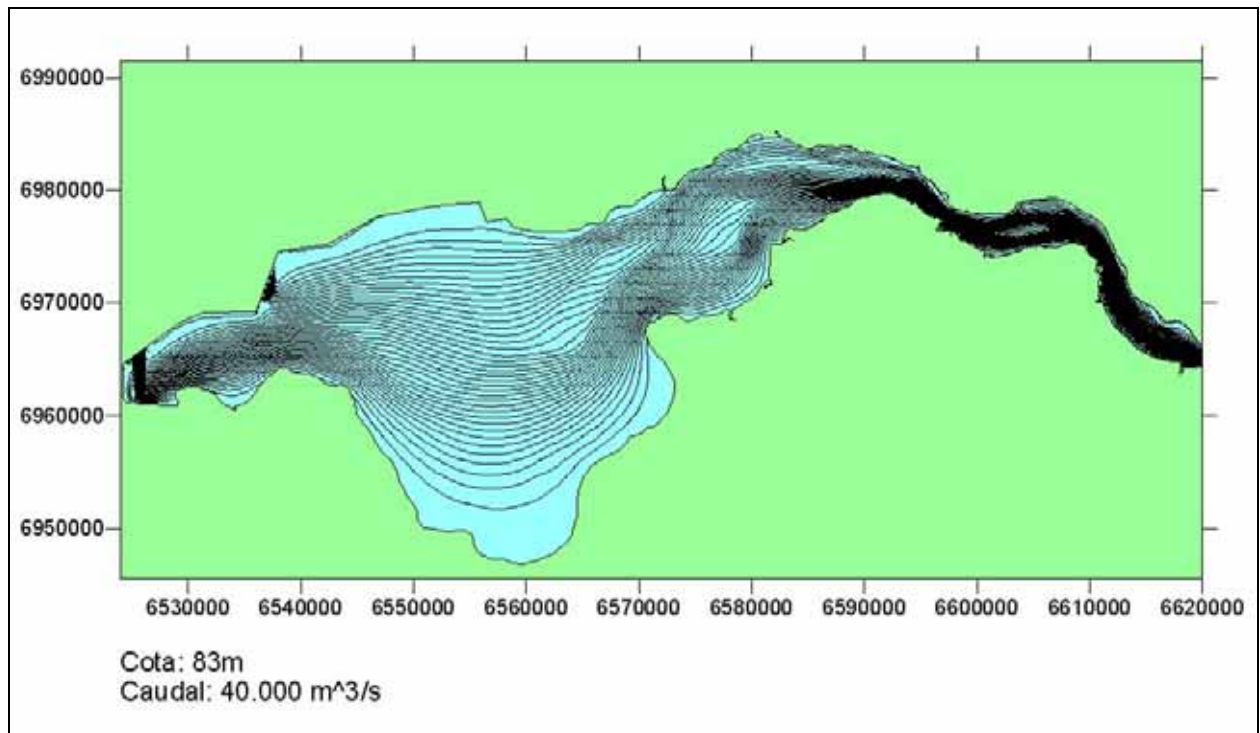
*Figura 2.3.27 Tubos de flujo de 1000 m³/s para el escenario E09b*



*Figura 2.3.28 Tubos de flujo de 1000 m³/s para el escenario E10b*



*Figura 2.3.29 Tubos de flujo de 1000 m³/s para el escenario E11b*

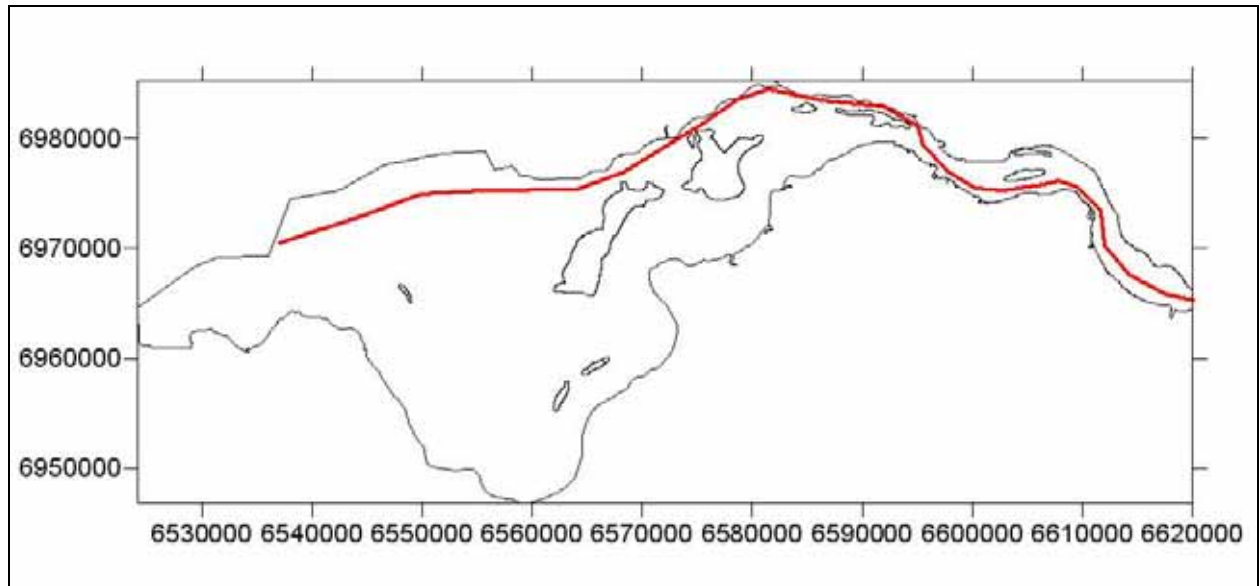


*Figura 2.3.30 Tubos de flujo de 1000 m<sup>3</sup>/s para el escenario E12b*

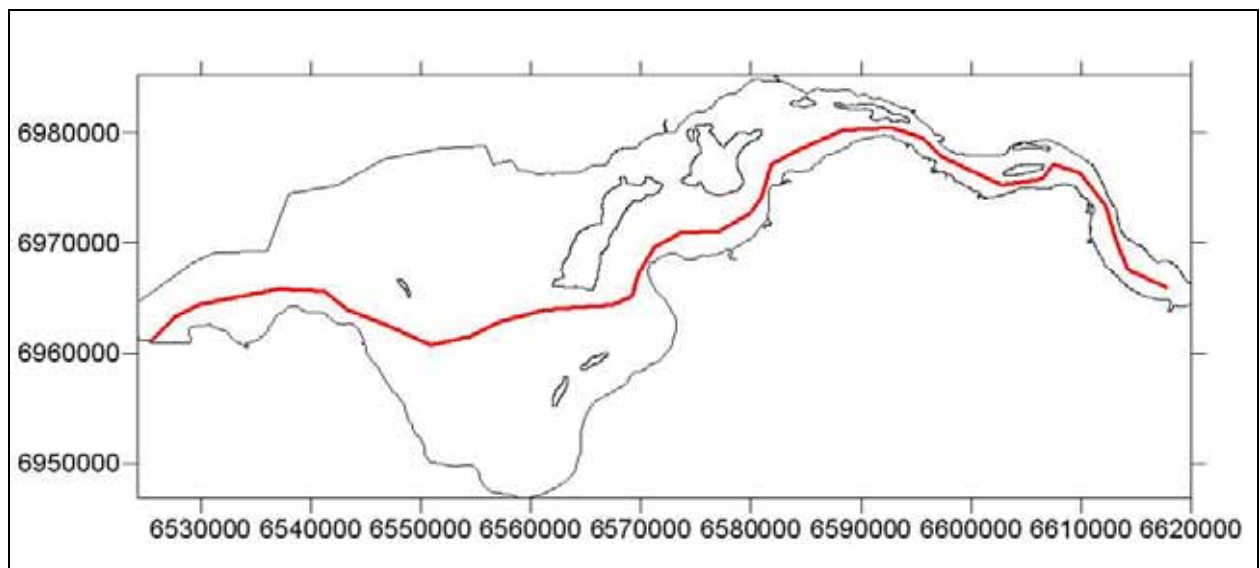
### 2.3.3 PERFILES LONGITUDINALES

En esta sección se presentan cortes longitudinales del pelo de agua, para caracterizar el remanso producido por la obra para diferentes condiciones hidrológicas y de operación.

Se efectuaron dos cortes, uno asociado al Brazo Aña-Cuá (figura 2.3.31) y otro al brazo principal (figura 2.3.32), que se bifurcan a partir de un recorrido común al entrar en la zona de transición.



**Figura 2.3.31** Corte longitudinal, brazo Aña-Cuá



**Figura 2.3.32** Corte longitudinal, brazo principal

Las figuras 2.3.33 y 2.3.34 presentan los perfiles correspondientes al corte sobre el brazo Aña-Cuá para cotas 76m y 83m, 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  $15.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , el desnivel del pelo de agua entre Garupá y el vertedero del Aña-Cuá 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.

La observación es similar para los cortes realizados siguiendo el Brazo Principal, mostrados en la figura 2.3.35 a cota 76 m y la figura 4.3.6 a cota 83 m.

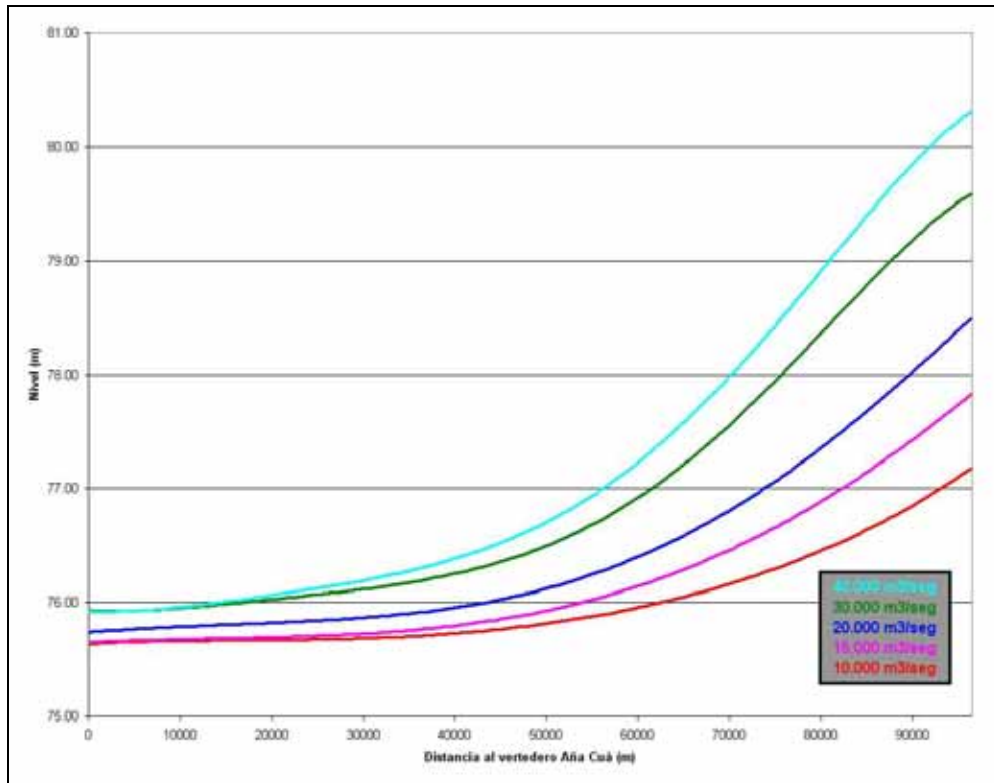


Figura 2.3.33 Cortes a cota 76 m, brazo Aña-Cuá

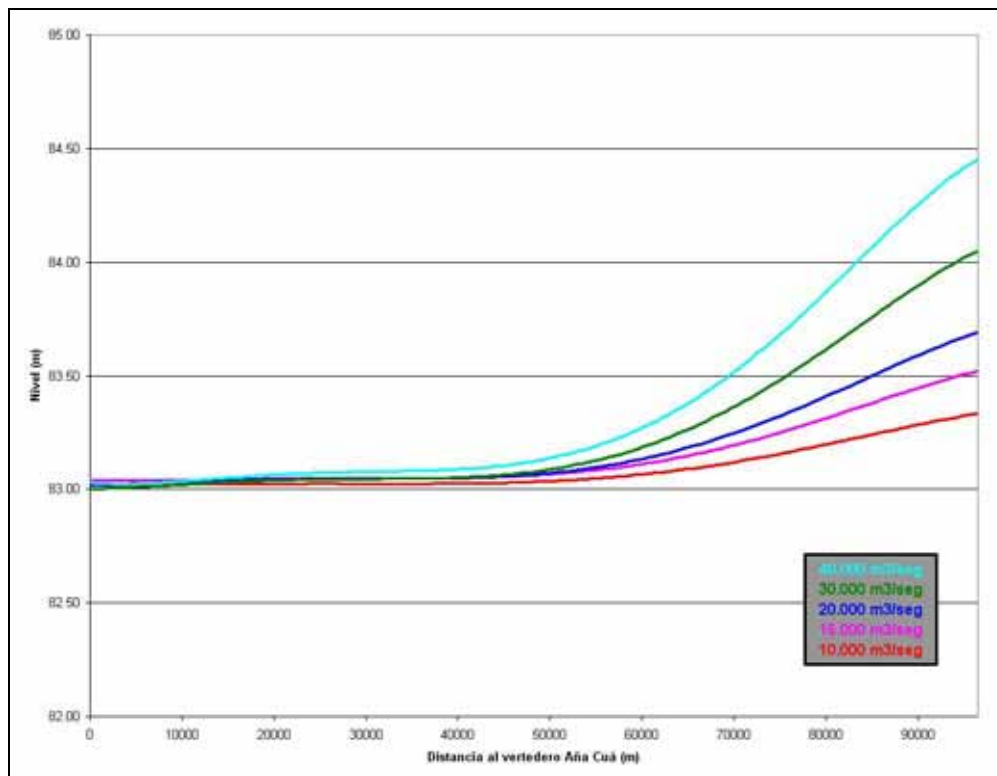


Figura 2.3.34 Cortes a cota 83 m, brazo Aña-Cuá

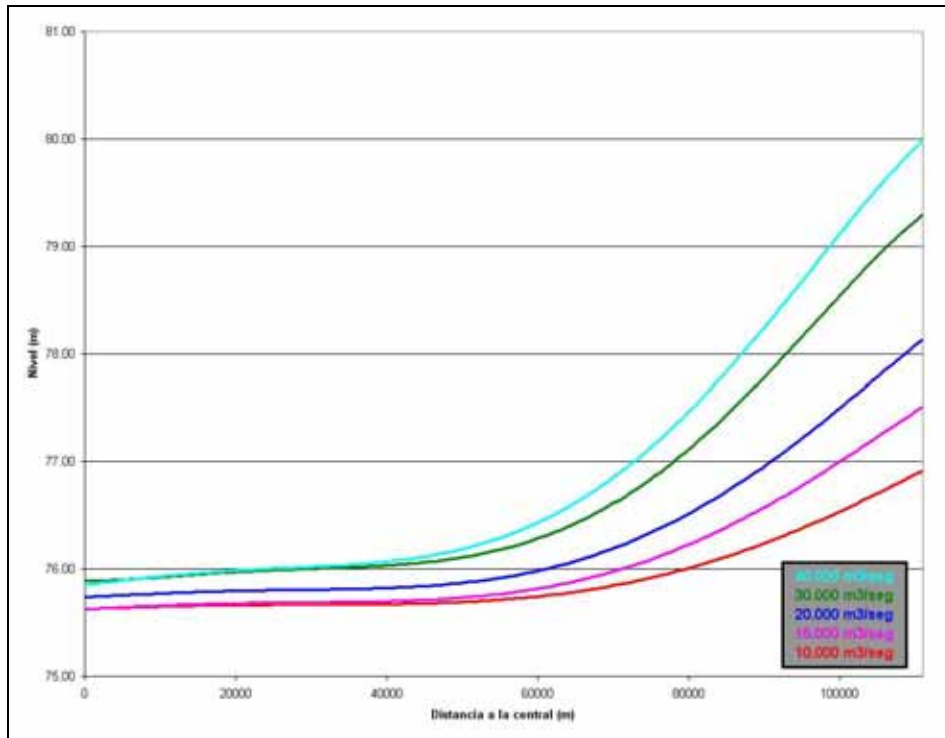


Figura 2.3.35 Cortes a cota 76 m, brazo principal

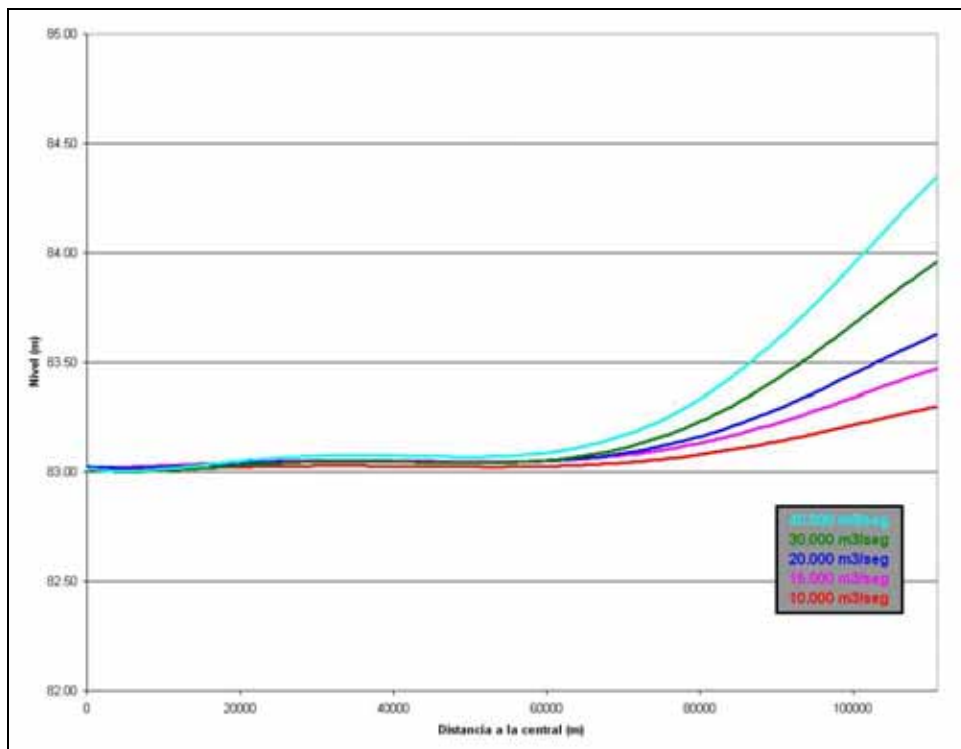


Figura 2.3.36 Cortes a cota 83 m, brazo principal

### 2.3.4 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 en el capítulo anterior, tomando como entrada al embalse el inicio de la zona de transición. Los resultados se presentan en las figuras 2.3.37 a 2.3.46.

Comparando la secuencia de figuras 2.3.37 a 2.3.41, todas correspondientes a cota 76 m, se observa 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 (figuras 2.3.42 a 2.3.46) 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.

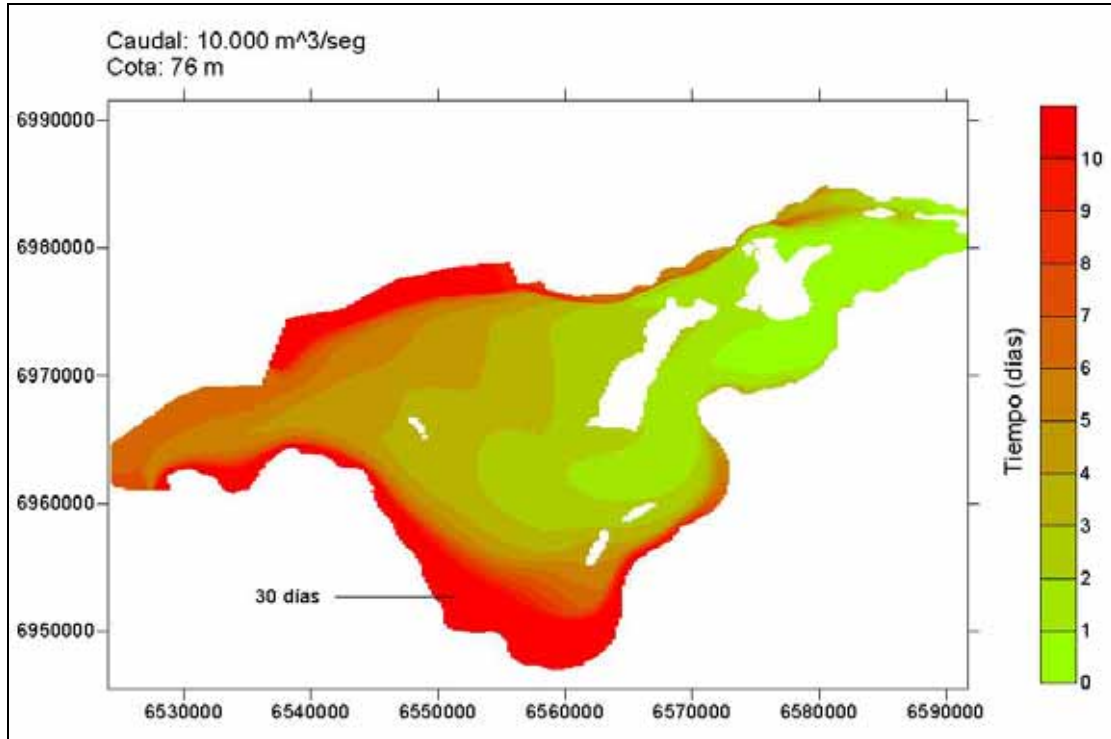


Figura 2.3.37 Tiempos de residencia para escenario E06a

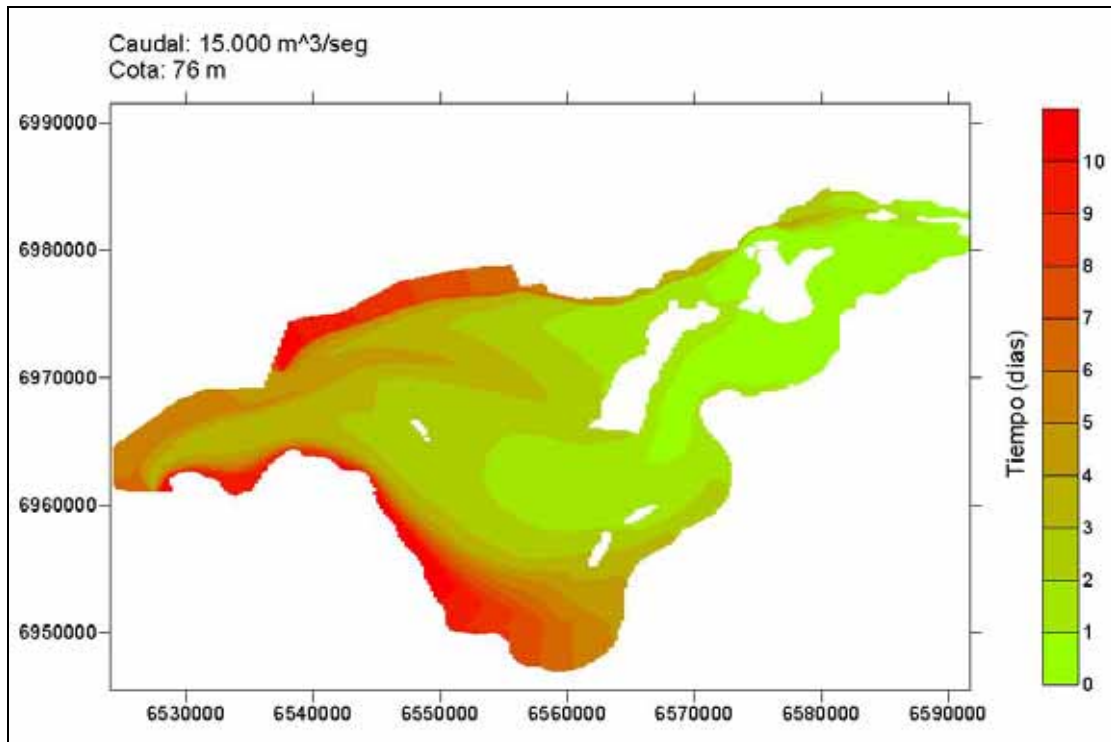


Figura 2.3.38 Tiempos de residencia para escenario E07a

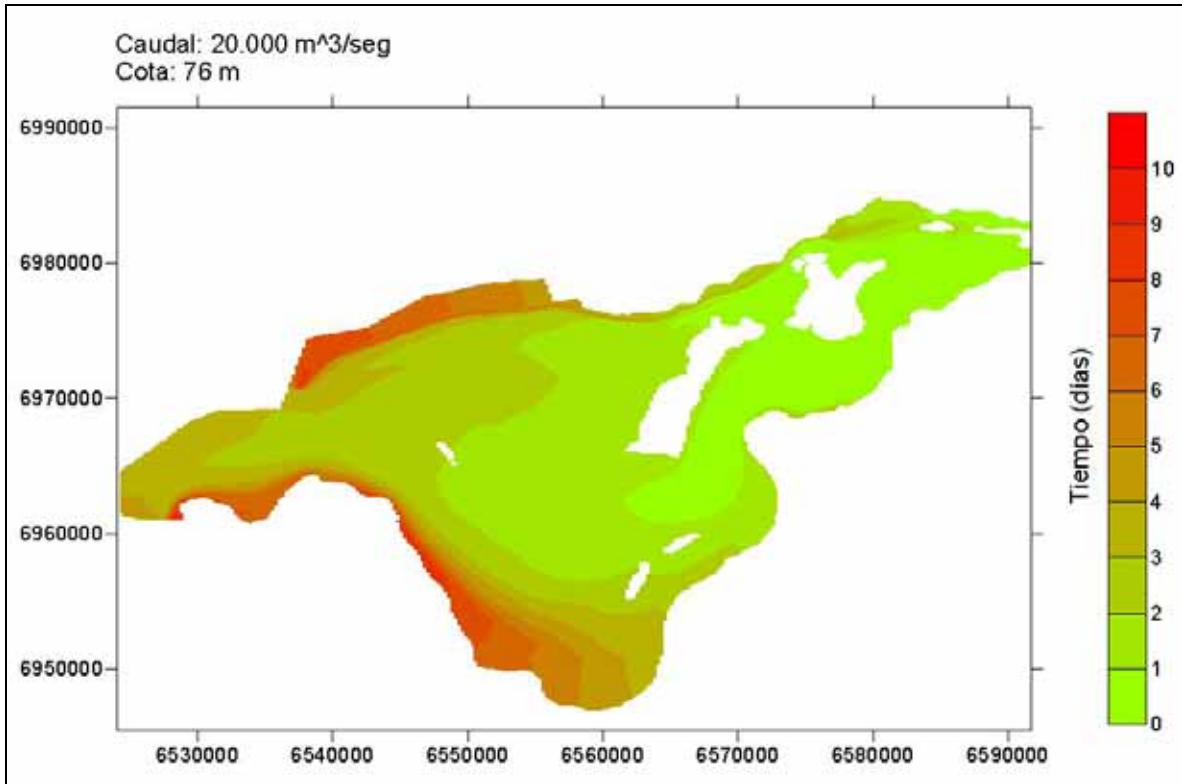


Figura 2.3.39 Tiempos de residencia para escenario E08a

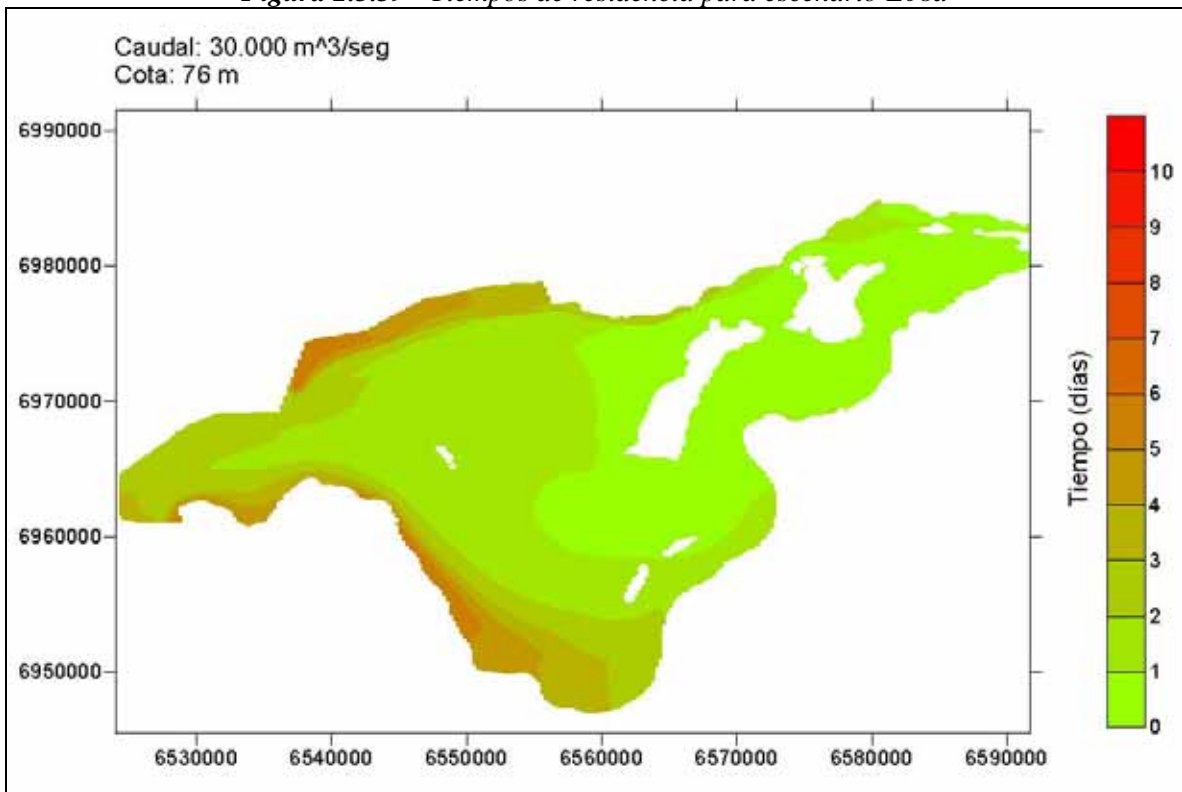


Figura 2.3.40 Tiempos de residencia para escenario E09a

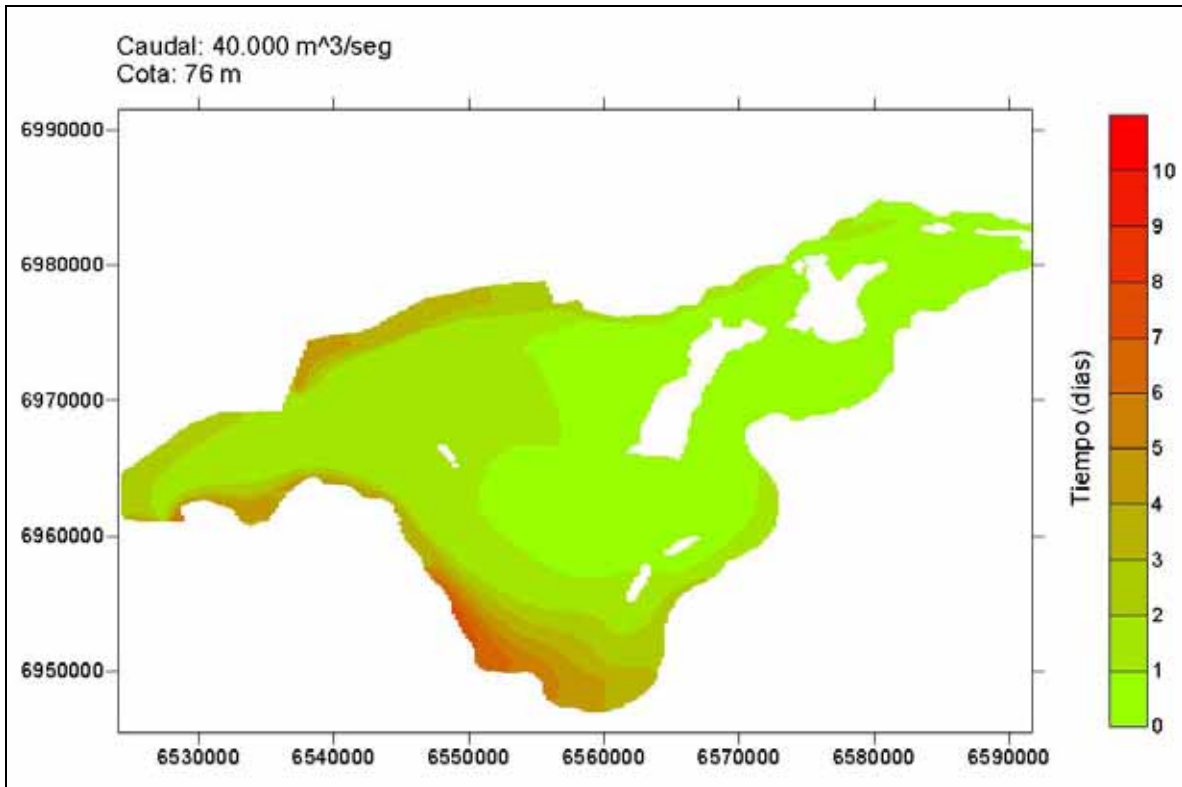


Figura 2.3.41 Tiempos de residencia para escenario E10a

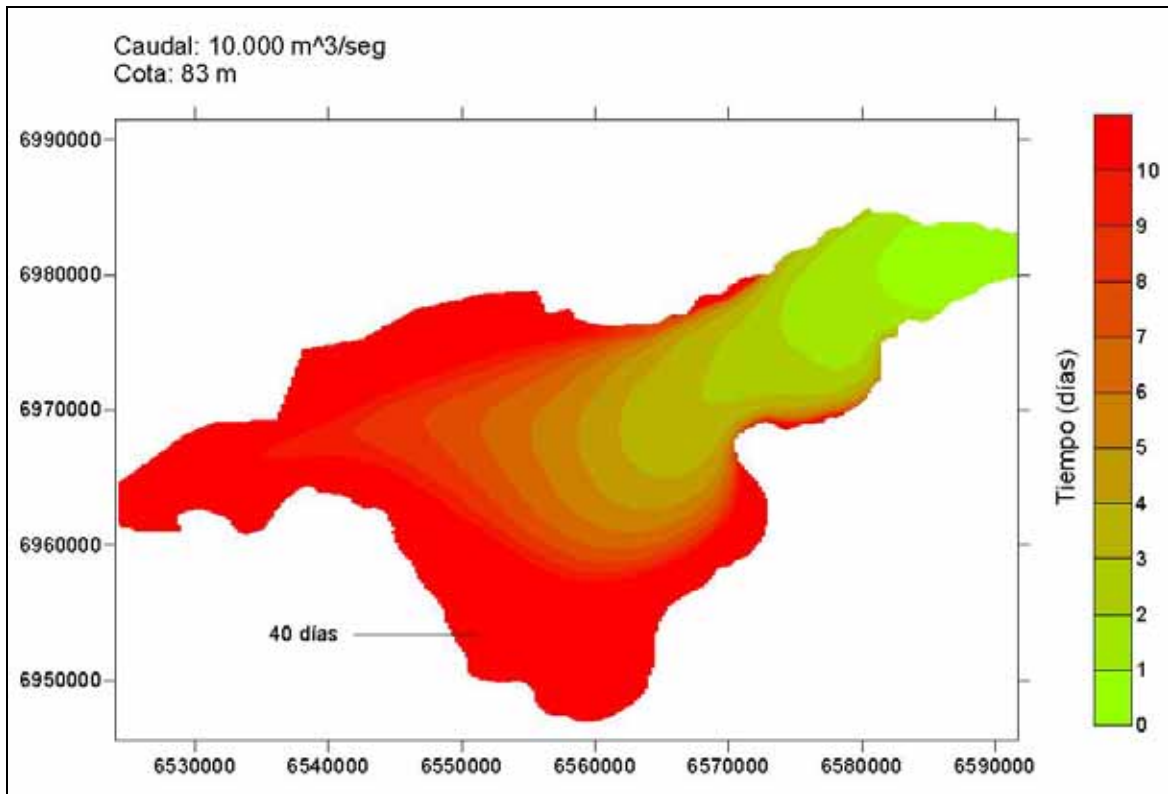


Figura 2.3.42 Tiempos de residencia para escenario E06b

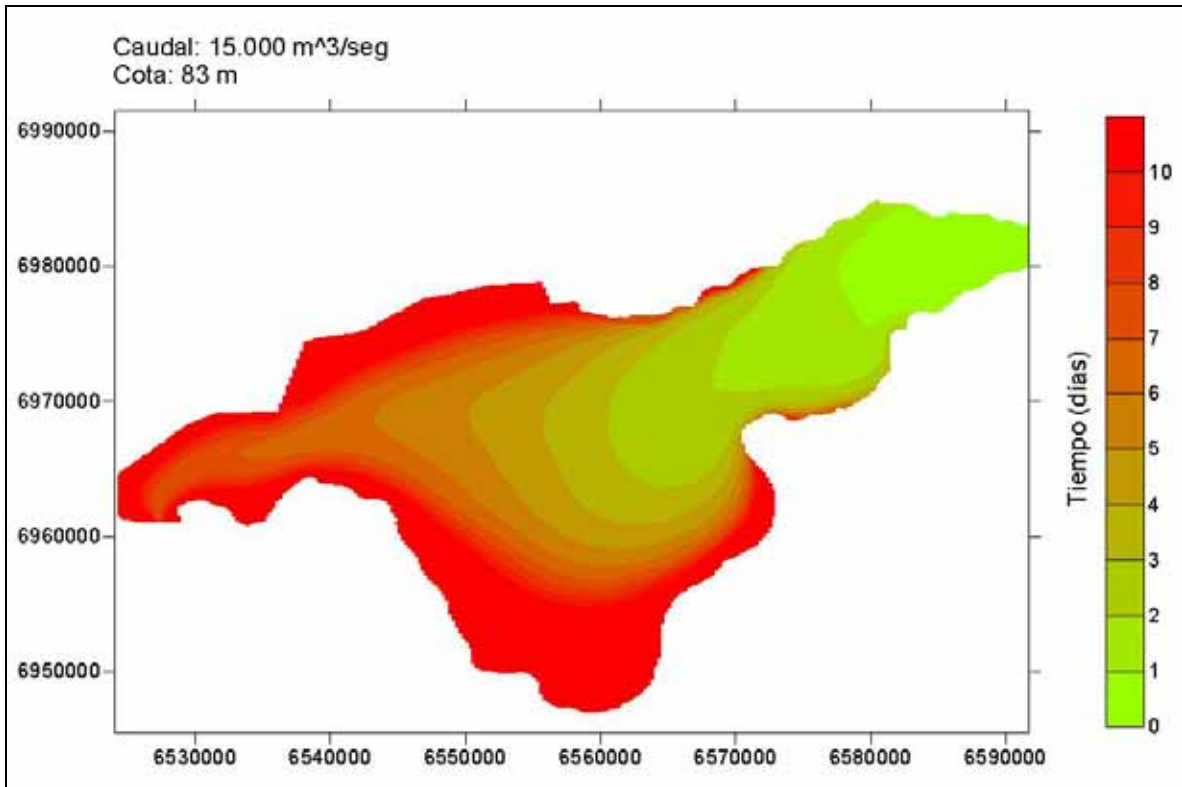


Figura 2.3.43 Tiempos de residencia para escenario E07b

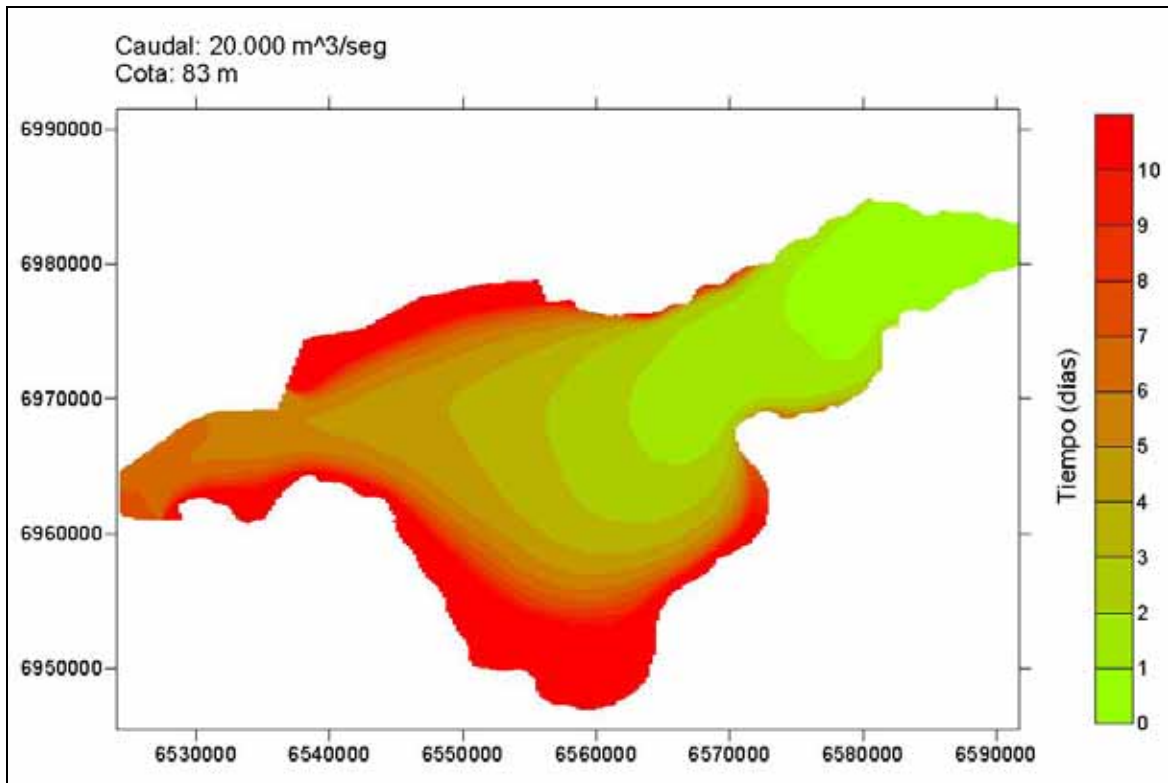


Figura 2.3.44 Tiempos de residencia para escenario E08b

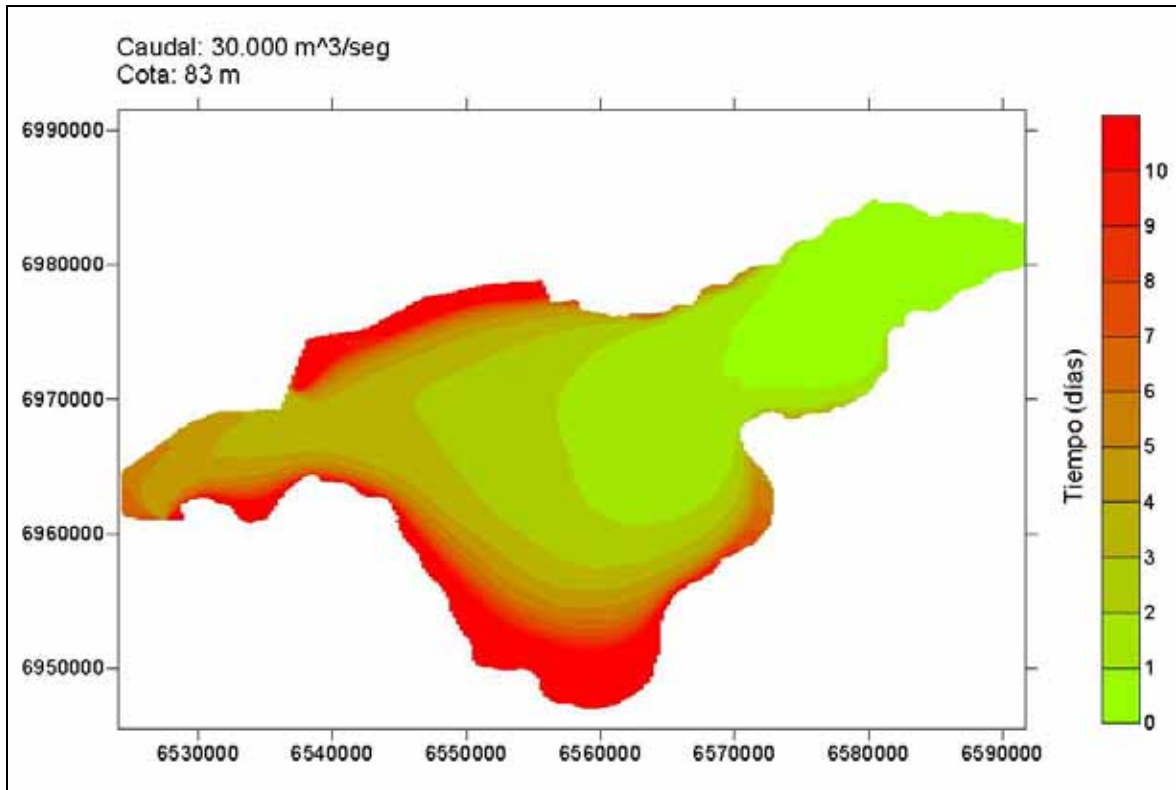


Figura 2.3.45 Tiempos de residencia para escenario E09b

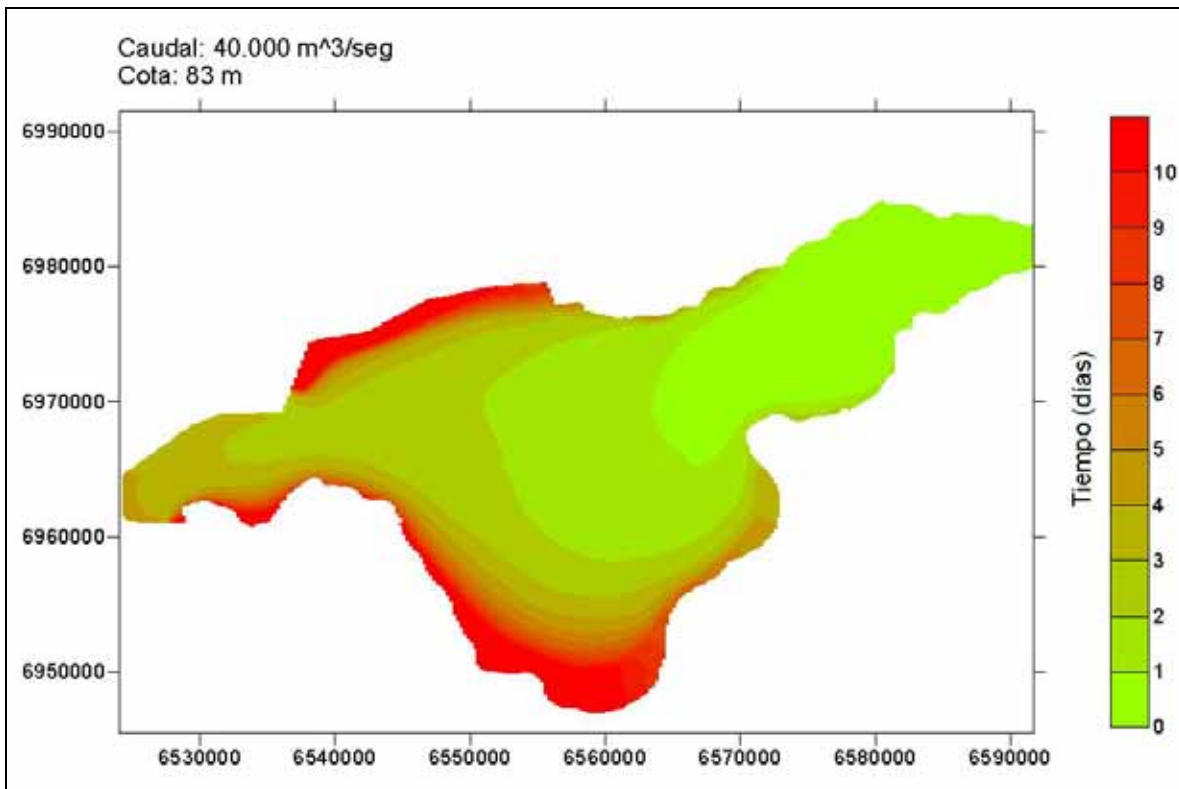


Figura 2.3.46 Tiempos de residencia para escenario E10b

## 3 MODELO DE TRANSPORTE DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

### 3.1 IMPLEMENTACIÓN

#### 3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO Y DEL ESQUEMA NUMÉRICO

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 de aguas poco profundas donde la escala de dispersión es mucho menor que la escala hidrodinámica, en base a una técnica lagrangiana 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. Los contaminantes pasivos que son transportados por la corriente natural, ya sean disueltos o en forma particulada (adsorbidos), también pueden ser modelados utilizando esta técnica.

La corriente natural puede ser dividida en dos partes, un movimiento medio y uno turbulento. El movimiento medio no sólo es responsable del transporte del material suspendido, sino que también contribuye al esparcimiento del mismo debido a los gradientes espaciales (advección diferencial). En cuanto al movimiento turbulento, este se encarga de dispersar el material mediante un proceso difusivo. A la combinación de ambos procesos, la advección diferencial y la difusión turbulenta, se la llama dispersión (Carreras et al, 1990).

La ecuación para el transporte de contaminantes, en un análisis bidimensional promediado en la vertical, es:

$$\frac{\partial}{\partial t}(hC) + \frac{\partial}{\partial x}(huC) + \frac{\partial}{\partial y}(hvC) - \frac{\partial}{\partial x}\left(hk_{11} \frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial x}\left(hk_{12} \frac{\partial C}{\partial y}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(hk_{21} \frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(hk_{22} \frac{\partial C}{\partial y}\right) = 0$$

donde  $C$  es la concentración media en la vertical,  $t$  el tiempo,  $x$  e  $y$  las coordenadas espaciales,  $h$  la profundidad,  $u$  y  $v$  las componentes de la velocidad en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente, y  $k_{11}$ ,  $k_{12}$ ,  $k_{21}$ , y  $k_{22}$  las componentes del tensor dispersión  $K$ .

La concentración de la mancha tiene una distribución gaussiana que puede ser descrita por la siguiente expresión:

$$C(x, y, t) = \frac{M\sqrt{D}}{\pi h_0} \cdot e^{\left\{-\left[a_{11}(x-x_0)^2 + 2a_{12}(x-x_0)(y-y_0) + a_{22}(y-y_0)^2\right]\right\}}$$

Las manchas se transportan dentro del dominio del modelo hidrodinámico global del embalse de Yacyretá, 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, tal como se indica en la figura 3.1.1. 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.



*Figura 3.1.1* Dominio del modelo de transporte de sólidos suspendidos

### 3.1.2 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 3.1.2 se observa la ubicación de las estaciones de medición y su denominación, en las cuales se efectúan, además, mediciones de otros parámetros de calidad del agua.



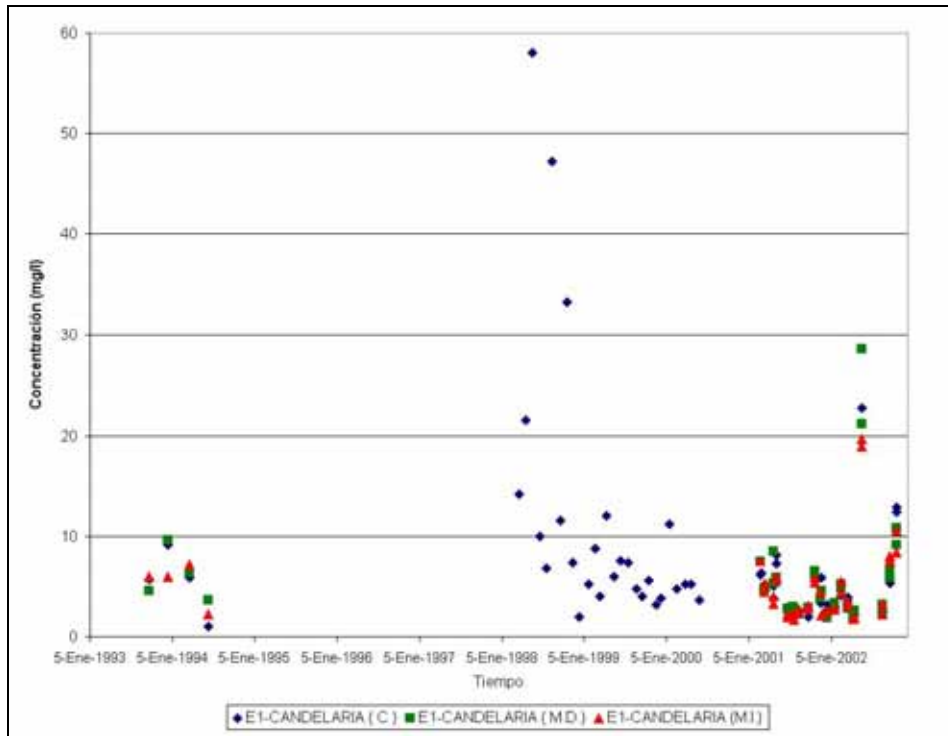
*Figura 3.1.2 Estaciones de monitoreo de calidad de agua*

Como criterio de calibración del modelo de transporte de sólidos suspendidos se impuso 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.

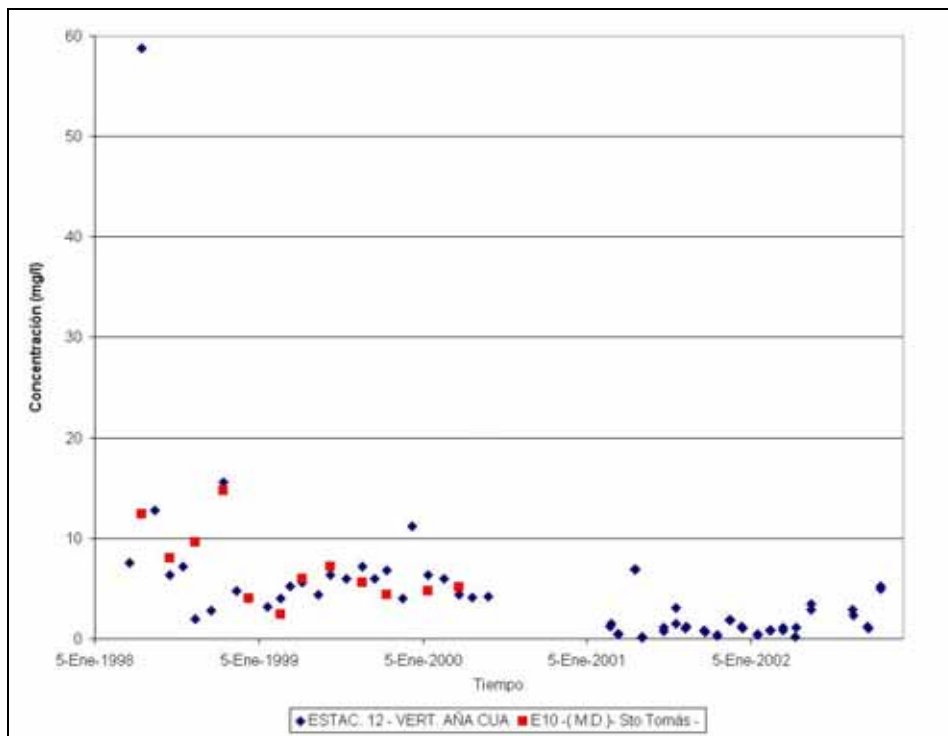
Las siguientes estaciones se seleccionaron como representativas de las condiciones de transporte de sólidos a la entrada y en las salidas del dominio de modelación:

- Estaciones EI-1 MD, EI-1 C y EI-1 MI para la entrada del modelo en Garupá-Candelaria.
- Estaciones E10 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.

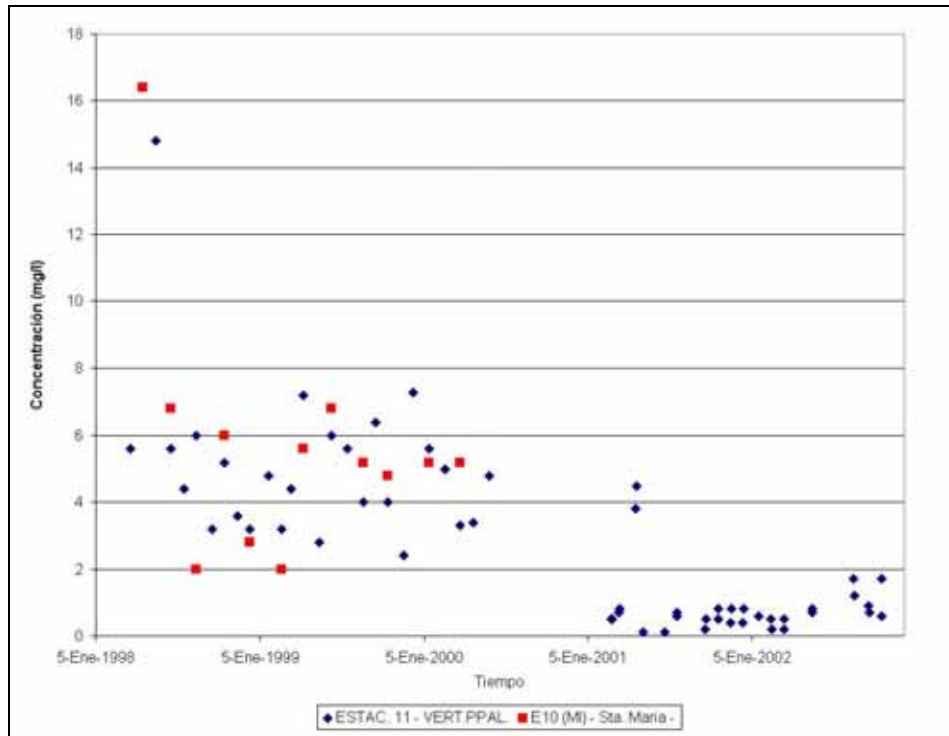
En las figuras 3.1.3 a 3.1.5 se muestran los datos de concentración de sólidos suspendidos correspondientes a la entrada y a las salidas por el brazo principal y el Aña-Cuá, respectivamente.



**Figura 3.1.3** Concentración de sólidos suspendidos en Garupá-Candelaria



**Figura 3.1.4** Concentración de sólidos suspendidos en la salida por el brazo principal



**Figura 3.1.5** Concentración de sólidos suspendidos en la salida por el brazo Aña-Cuá

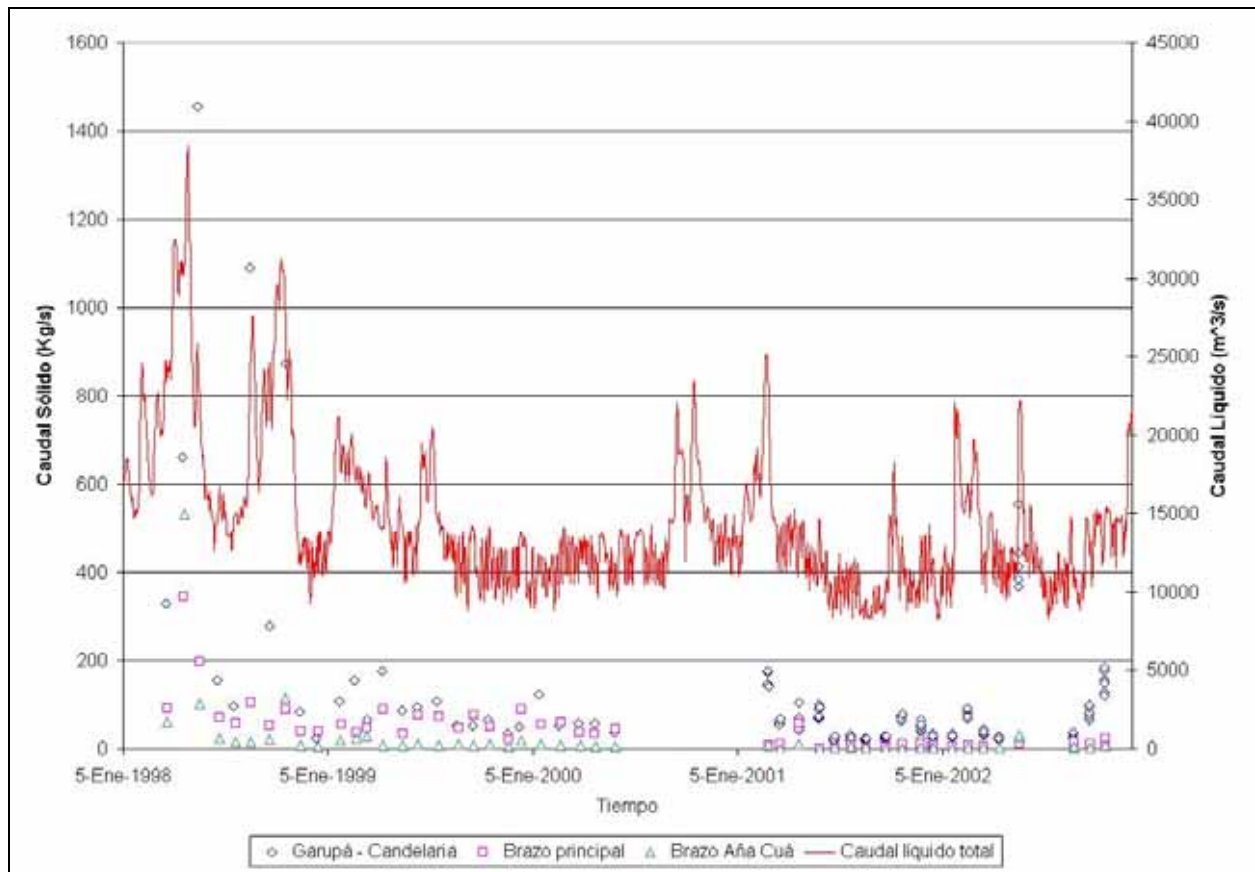
Los muestreos se realizaron con una frecuencia aproximadamente mensual, pero las series no son enteramente compatibles entre sí. Por ejemplo, los datos que corresponden a la entrada, en Garupá-Candelaria, se extienden entre el 23/09/93 y el 20/10/02, con una falta de datos en el período que va del 15/06/94 al 23/03/98 para la estación ubicada en el centro del río (EI-1 C - Candelaria) y del 15/06/94 al 28/02/01 para las estaciones ubicadas en las márgenes del río (EI-1 MI y EI-1 MD - Candelaria). Por su parte, los datos que corresponden a las salidas del modelo, en cambio, se extienden entre el 25/03/98 y el 24/10/02 para las estaciones EI 11 – vertedero principal y EI 12 – vertedero Aña-Cuá, y entre el 25/03/98 y el 30/03/00 para las estaciones EI 10 MD – Sto. Tomás y EI 10 MI – Sta. María. Además, las mediciones en las distintas estaciones no son simultáneas.

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.

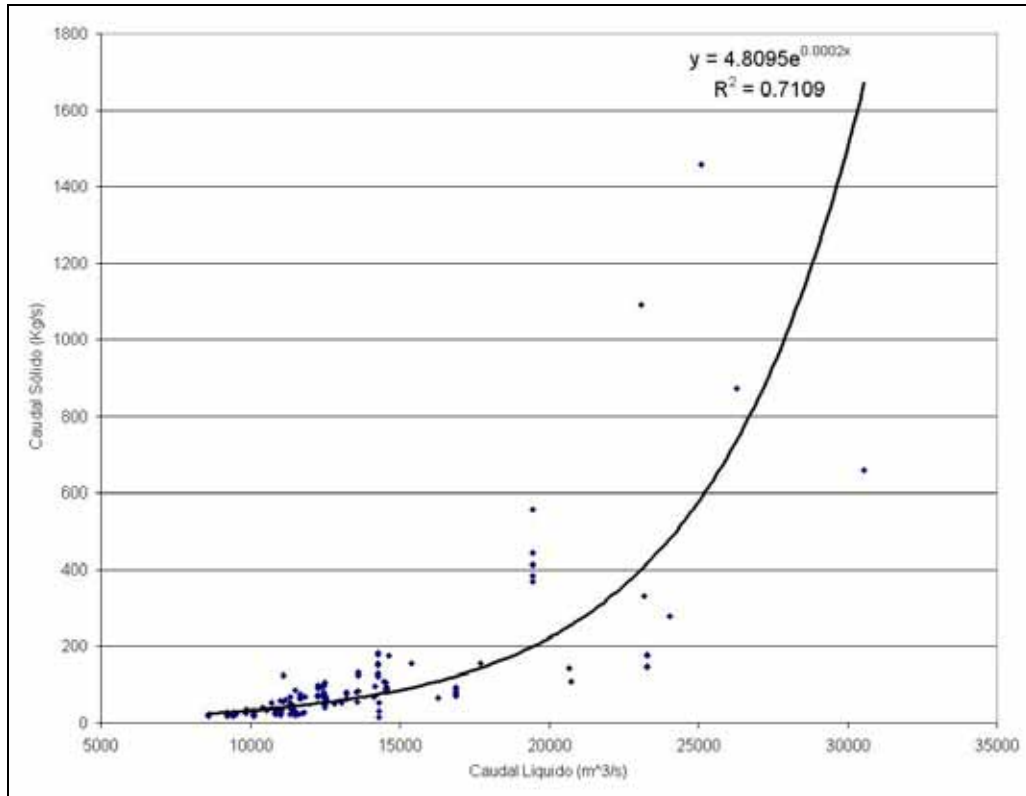
Las concentraciones representativas en la entrada y las dos salidas del modelo fueron multiplicadas por los caudales líquidos correspondientes a las respectivas fechas de muestreo para obtener los caudales sólidos, los cuales se muestran en la figura 3.1.6, donde también se presenta el caudal líquido total como referencia.



**Figura 3.1.6** Caudales sólidos entrantes y salientes

La figura 3.1.7 muestra la correlación existente entre los caudales sólido y líquido ingresantes al modelo. Se observa que esta 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.



**Figura 3.1.7** Correlación entre caudales sólido y líquido ingresantes al embalse

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 3.1.1, junto con las correspondientes tasas de exportación.

**Tabla 3.1.1** Aporte marginal de sólidos al embalse de Yacyretá

Método	Tasa de Erosión Específica [ton/km <sup>2</sup> /año]	Erosión Total [ton/año]
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.

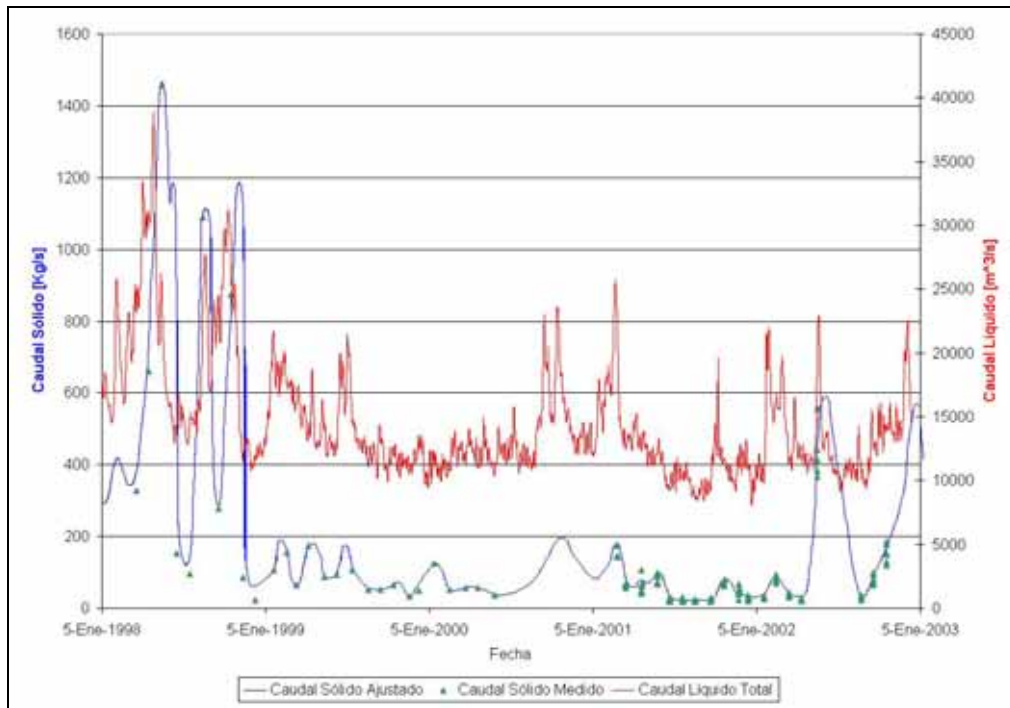
Para modelar el aporte marginal, éste se dividió según lo que le corresponde a cada margen. Para cada margen se discriminó entre una parte que ingresa estrictamente por la margen del dominio del modelo de sólidos, a la que se designó “Marginal”; y otra parte que lo hace aguas arriba del dominio del modelo de sólidos (zona de no sedimentación), que fue cargada a la sección de ingreso del modelo, a la que se denominó “Cauce” (ver tabla 3.1.2).

**Tabla 3.1.2** Distribución del aporte marginal de sólidos al embalse de Yacyretá

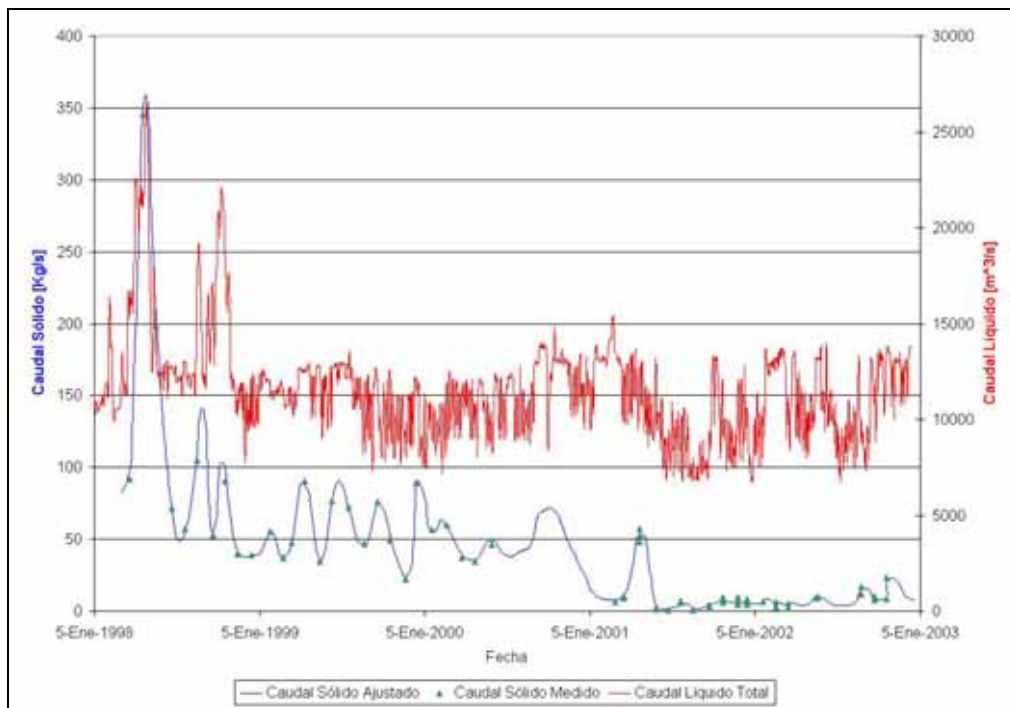
Margen	Total [kg/s]	Cauce [kg/s]	Marginal [kg/s]
Argentina	18,1	14,3	3,78
Paraguaya	26,3	7,19	19,1
<b>Total</b>	<b>44,4</b>	<b>21,5</b>	<b>22,9</b>

### 3.1.3 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 la figura 3.1.8 se muestran los puntos agregados a las series. 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. Las series resultantes se muestran en la figura 3.1.9. Estas constituyen el punto de partida del filtrado.

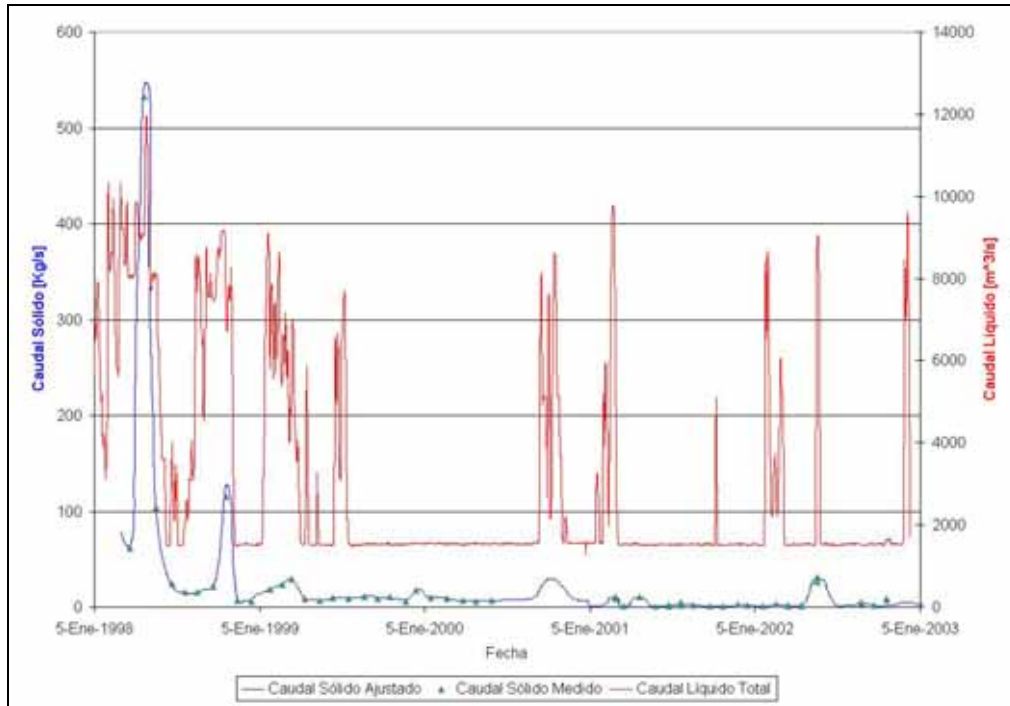


a) Caudal sólido entrante



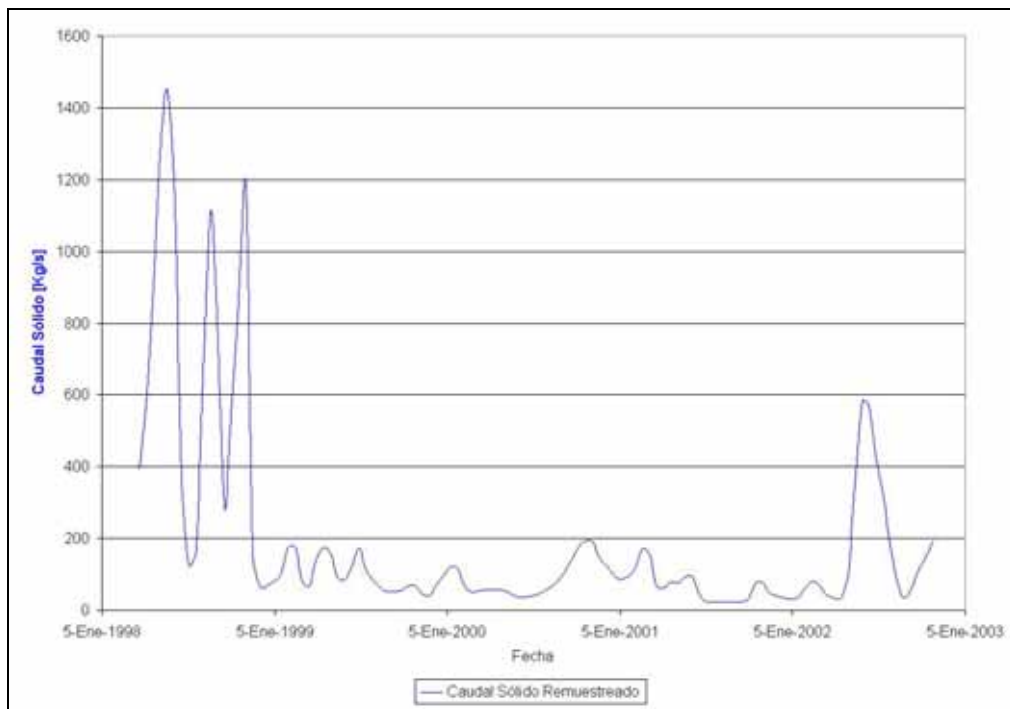
b) Caudal sólido saliente por el brazo principal

**Figura 3.1.8** Series completadas de caudales sólidos (continúa)



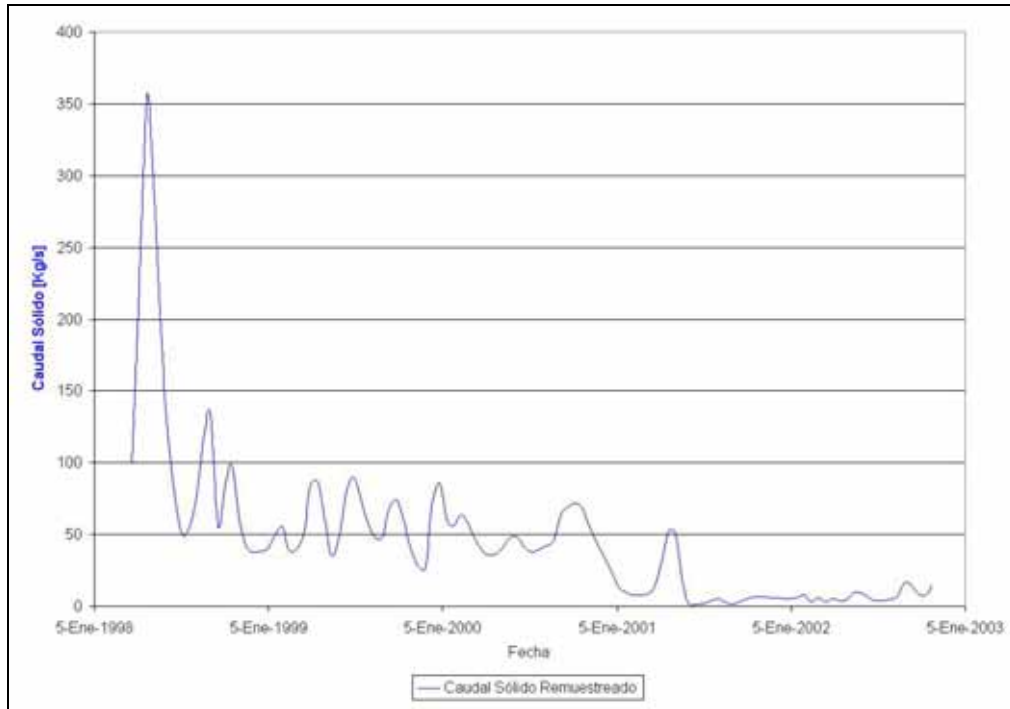
c) Caudal sólido saliente por el brazo Aña-Cuá

Figura 3.1.8 Series completadas de caudales sólidos (final)

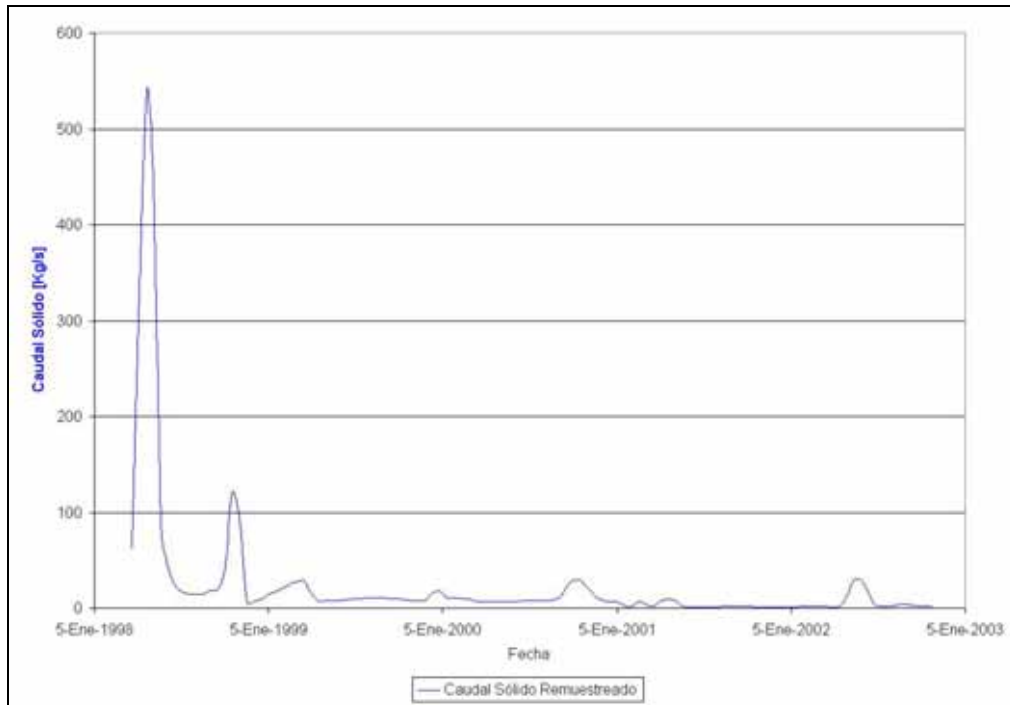


a) Caudal sólido entrante

Figura 3.1.9 Series remuestreadas de caudales sólidos (continúa)



b) Caudal sólido saliente por el brazo principal

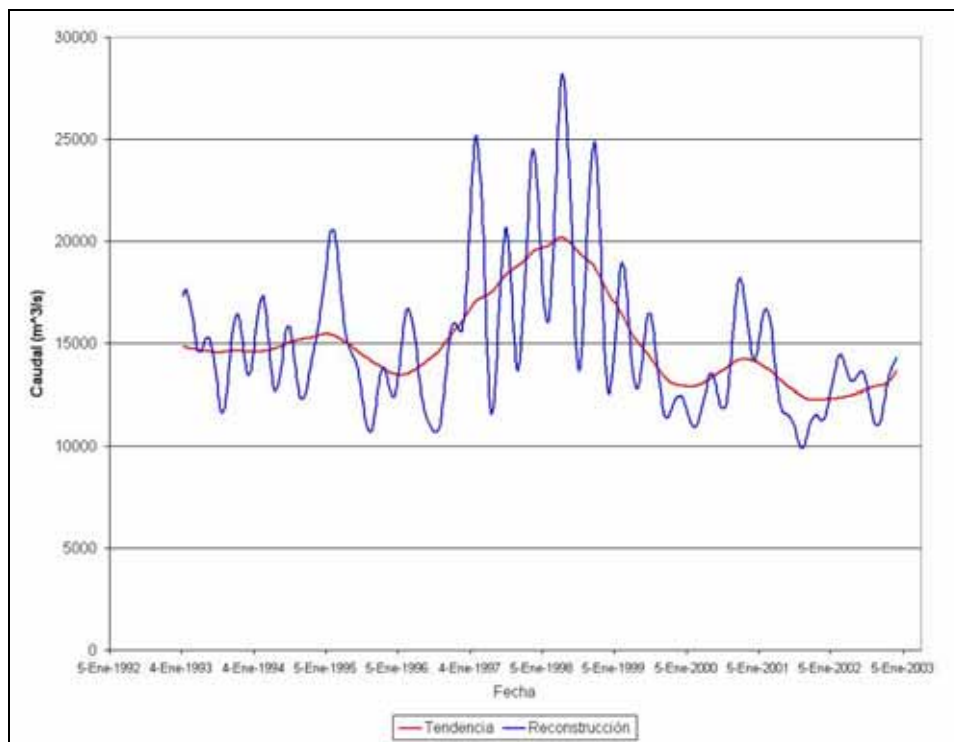


c) Caudal sólido saliente por el brazo Aña-Cuá

**Figura 3.1.9** Series remuestreadas de caudales sólidos (final)

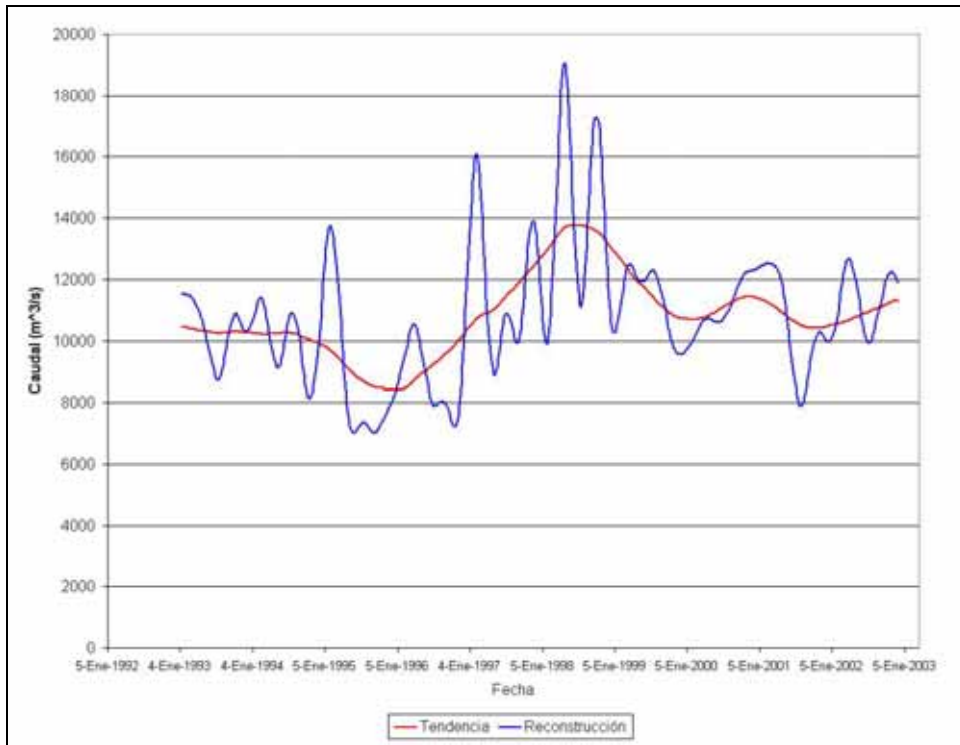
El filtrado se llevó a cabo mediante la técnica de Análisis Espectral Singular (Broomhead and King, 1986; Vautard and Ghil, 1989; Vautard et al., 1992), ó SSA por sus siglas en inglés, que es una variante del método de las componentes principales (PCA). Se utilizó el “SSA-MTM Toolkit” (Myles Allen et 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.

En la figura 3.1.10 se muestran la tendencia y la señal reconstruida con cinco componentes para el caudal líquido ingresante y los dos salientes. Análogamente, la figura 3.1.11 presenta los resultados para los caudales sólidos. 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.

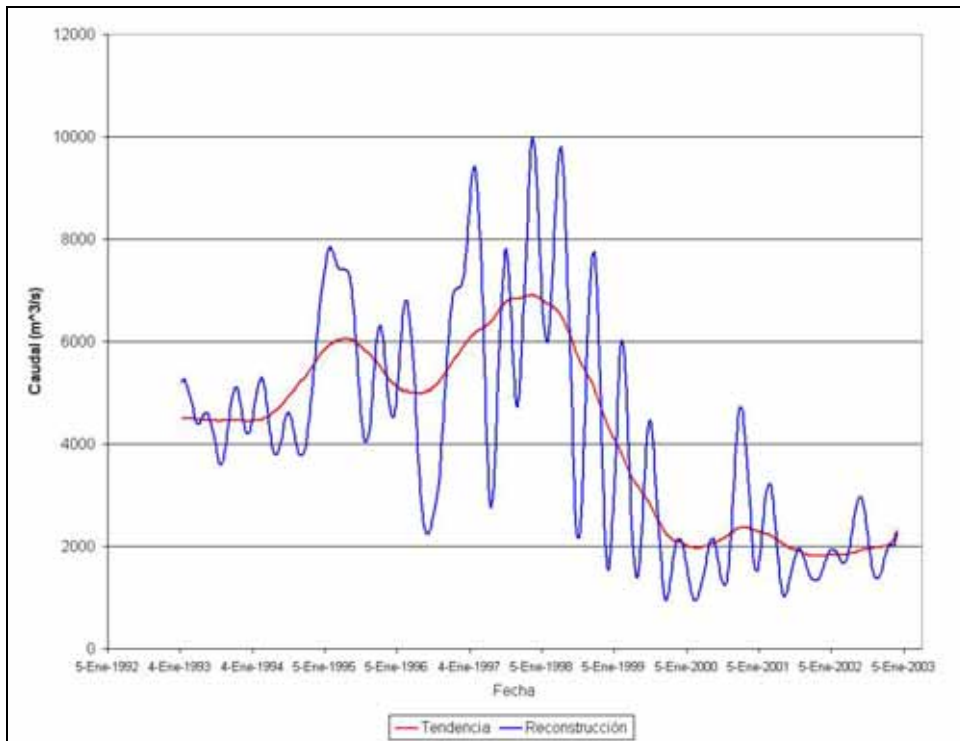


a) Caudal líquido entrante

**Figura 3.1.10** Tendencia y reconstrucción con cinco componentes del caudal líquido (continúa)

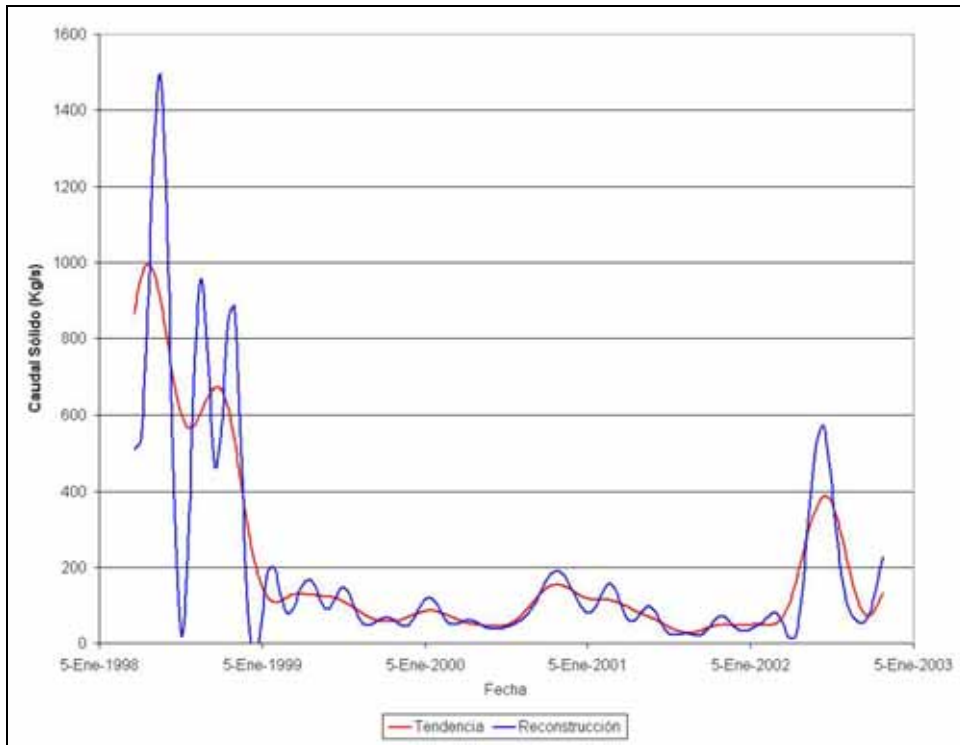


b) Caudal líquido saliente por el brazo principal

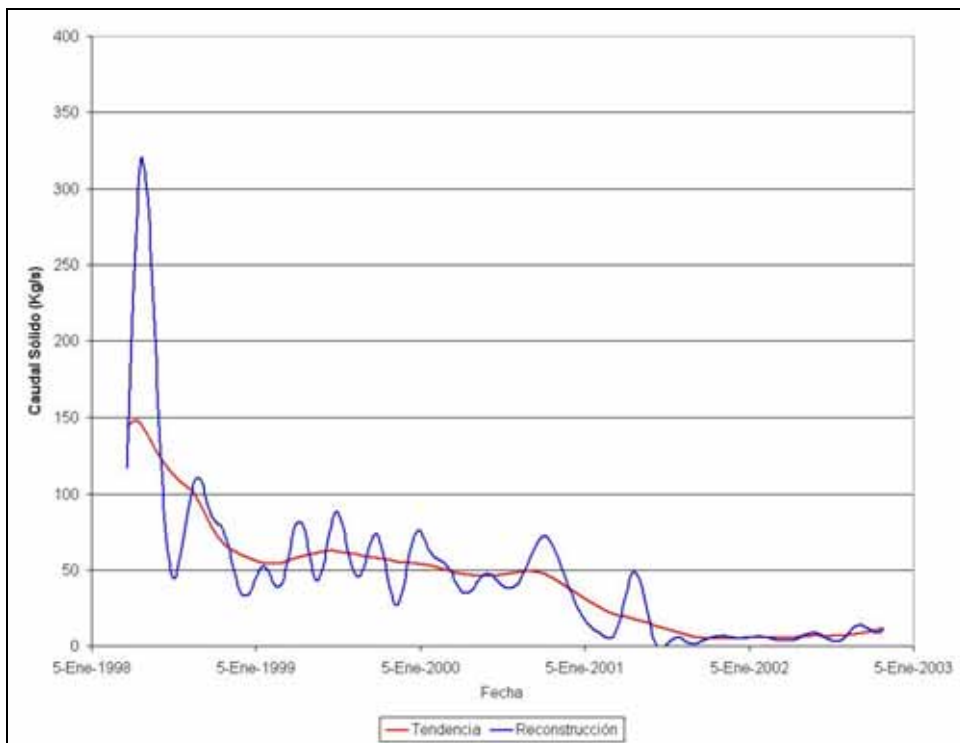


c) Caudal líquido saliente por el brazo Aña-Cuá

**Figura 3.1.10** Tendencia y reconstrucción con cinco componentes del caudal líquido (final)

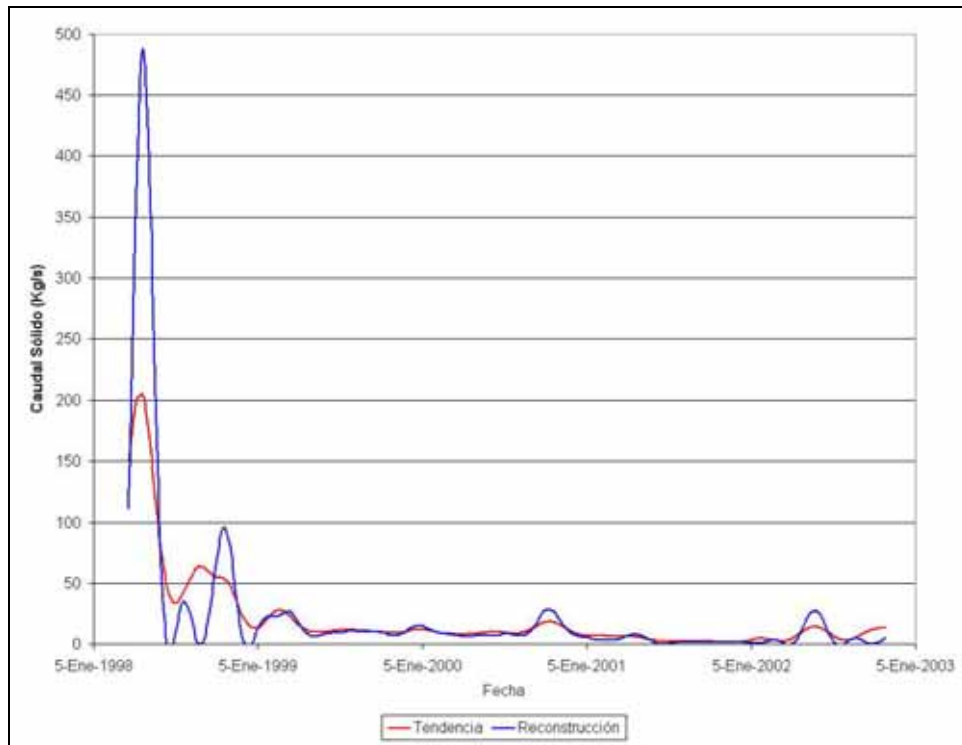


a) Caudal sólido entrante



b) Caudal sólido saliente por el brazo principal

**Figura 3.1.11** Tendencia y reconstrucción con cinco componentes del caudal sólido (continúa)



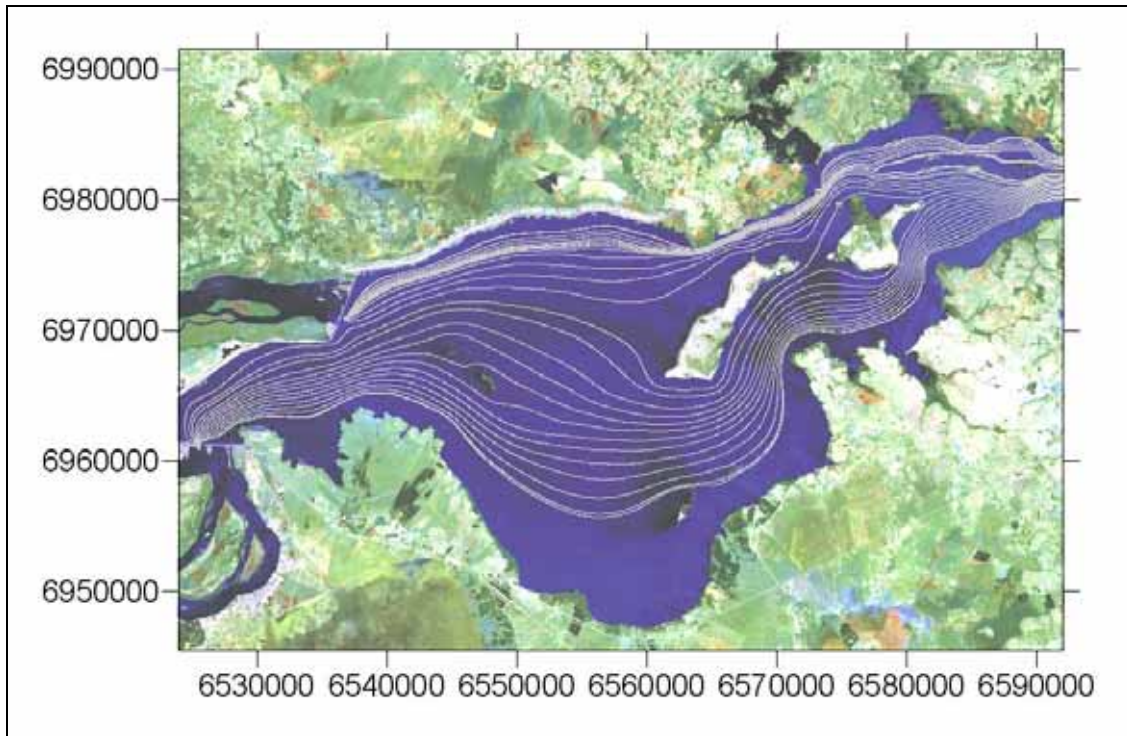
c) Caudal sólido saliente por el brazo Aña-Cuá

**Figura 3.1.11** Tendencia y reconstrucción con cinco componentes del caudal sólido (final)

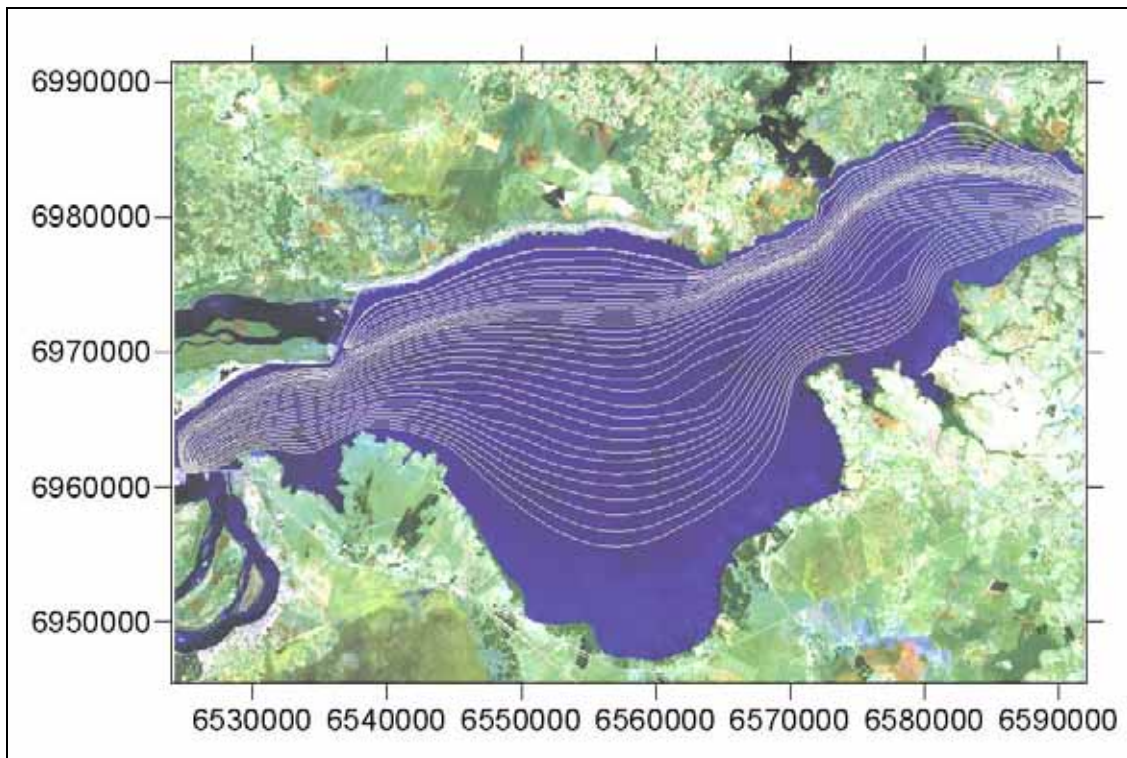
Se considera que las series de tendencias obtenidas con la técnica de SSA contienen información significativa respecto del balance global de sólidos suspendidos sobre escalas de tiempo estacionales e interanuales. En consecuencia, éstas se utilizaron para definir escenarios de calibración.

### 3.1.4 DISCRETIZACIÓN DEL TRANSPORTE

El transporte espacialmente continuo de sólidos transportado por la corriente ingresante en el borde de aguas arriba del modelo fue discretizado en treinta y cinco trayectorias de manchas, que proveyeron una cobertura tal como para que su superposición constituyera una distribución lo suficientemente continua. En las figuras 3.1.12 y 3.1.13 se muestran esas trayectorias para el caudal de  $15.000 \text{ m}^3/\text{s}$  y las cotas de embalse actual y futura.



*Figura 3.1.12* Trayectorias de manchas lagrangianas para cota 76 m



*Figura 3.1.13* Trayectorias de manchas lagrangianas para cota 83 m

El aporte marginal se representó como una serie de aportes puntuales en las desembocaduras de los arroyos de las subcuencas, tal como se indica en la figura 3.1.14. Se eligieron, además, dos puntos adicionales sobre la margen argentina que no se corresponden con arroyos, a los que se denominó “Estación 1” y “Estación 2” (figura 3.1.14). El aporte correspondiente a cada estación se obtuvo proporcionalmente según el área de cuenca asignada. Los aportes marginales resultantes para la margen izquierda (argentina) y la derecha (paraguaya) se indican en las tabla 3.1.3 y 3.1.4, respectivamente.



Figura 3.1.14 Estaciones de aporte marginal

Tabla 3.1.3 Aportes marginales sobre la margen argentina

Subcuenca	Area [km <sup>2</sup> ]	Porcentaje	Sólidos [kg/s]
Ao. Nambae	53,0	11,7 %	0,443
Ao. del medio	48,0	10,6 %	0,401
Ao. yacarey	75,0	16,6 %	0,627
Ao. Naranjito	38,0	8,41 %	0,318
Ao. Ombú	48,0	10,6 %	0,401
Estación 1	100	22,1 %	0,836
Estación 2	90,0	19,9 %	0,752
<b>Total</b>	<b>452</b>	<b>100 %</b>	<b>3,78</b>

Tabla 3.1.4 Aportes marginales sobre la margen paraguaya

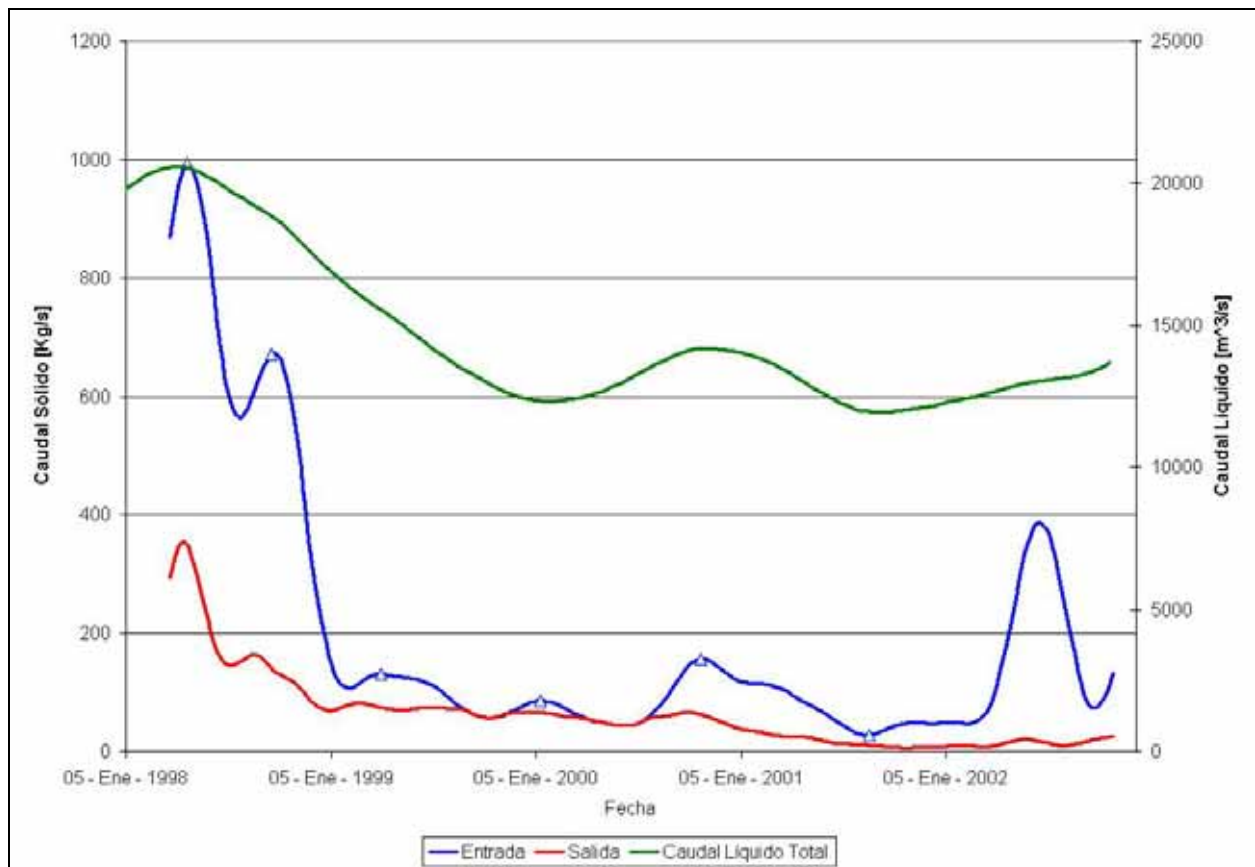
Subcuenca	Area [km <sup>2</sup> ]	Porcentaje	Sólidos [kg/s]
Ao. Aguapey	1600	60,8 %	11,6
Ao. Tacuary	1000	38,0 %	7,28
Ao. San Martín	30,0	1,14 %	0,218
<b>Total</b>	<b>2630</b>	<b>100 %</b>	<b>19,1</b>

### 3.2 CALIBRACIÓN

#### 3.2.1 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.

Se seleccionaron escenarios de calibración a partir de las series de tendencias de caudales sólidos. Estos se muestran en la figura 3.2.1 y se describen en la tabla 3.2.1, 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 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.



**Figura 3.2.1** Escenarios de calibración

**Tabla 3.2.1** Escenarios de calibración

Escenario	Fecha	Caudal	Candelaria	Brazo Aña-Cuá	Brazo Principal
E I	24/04/1998	Sólido	995	205	146
		Líquido	20.574	9.774	10.800
E II	21/09/1998	Sólido	671	58,3	82,6
		Líquido	19.496	5.100	14.396
E III	04/04/1999	Sólido	130	16,6	57,7
		Líquido	15.400	3.300	12.100
E IV	14/01/2000	Sólido	86,0	11,6	53,8
		Líquido	11.711	1.780	9.931
E V	25/10/2000	Sólido	155	17,9	45,1
		Líquido	14.200	2.548	11.652
E VI	21/08/2001	Sólido	27,4	2,58	7,50
		Líquido	12.900	1.875	11.025

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:

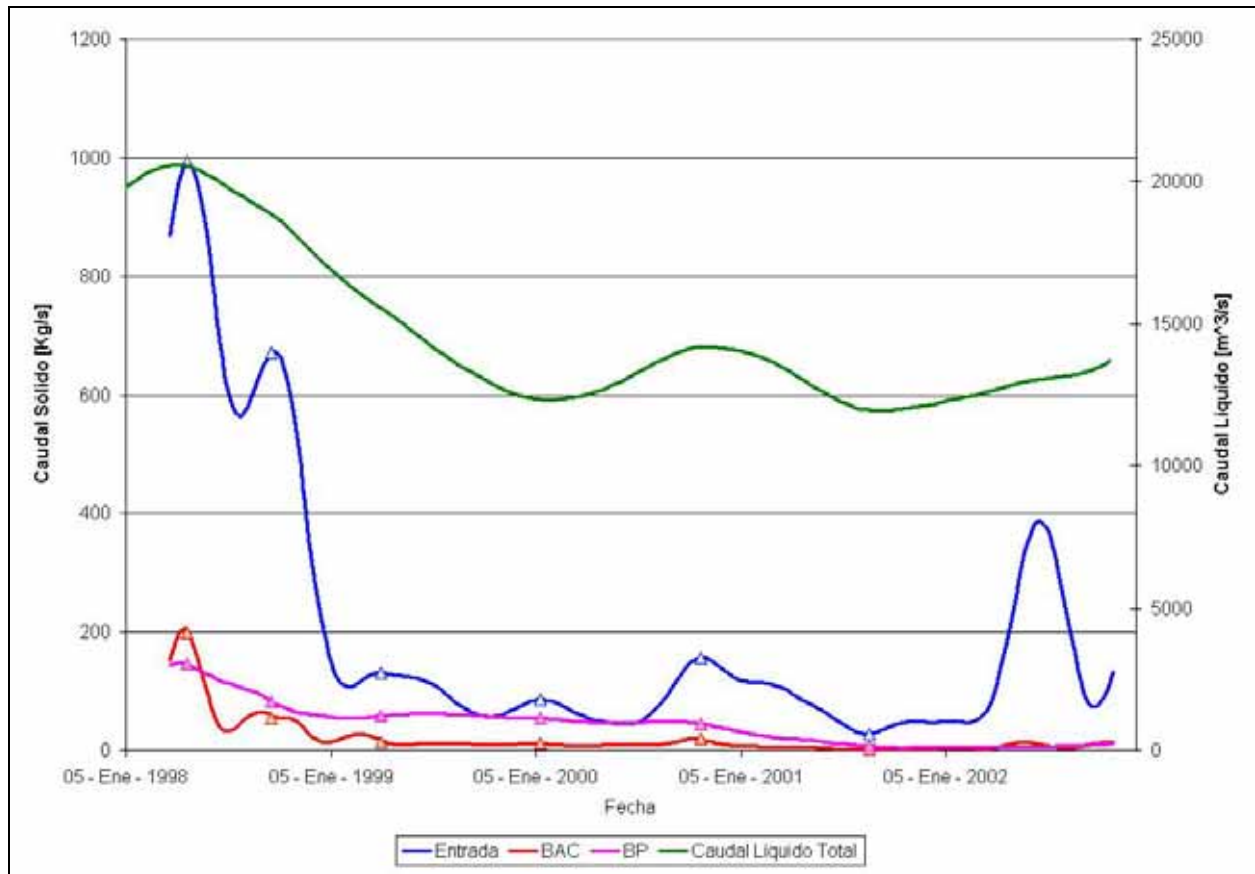
- El diámetro medio de las partículas sólidas suspendidas ( $d_{50}$ ) o, más estrictamente, su velocidad de caída, que regula la pérdida por sedimentación en el embalse.
- Un parámetro de distribución que se corresponde con la fracción de caudal sólido total entrante al embalse que enfilea hacia el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

### 3.2.2 RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

En la tabla 3.2.2 se presentan los valores de los parámetros con los cuales se calibró el modelo. En la figura 3.2.2 se muestran los caudales sólidos calculados y las tendencias de los registrados. Se observa que, con los dos parámetros utilizados puede lograrse un acuerdo exacto entre ambos.

**Tabla 3.2.2** Diámetros obtenidos en la calibración

ESCENARIO	$d_{50}$ [ $\mu\text{M}$ ]	FRACCIÓN BP
E I	17,3	0,79
E II	21,0	0,83
E III	7,00	0,39
E IV	3,20	0,17
E V	7,50	0,59
E VI	7,10	0,63

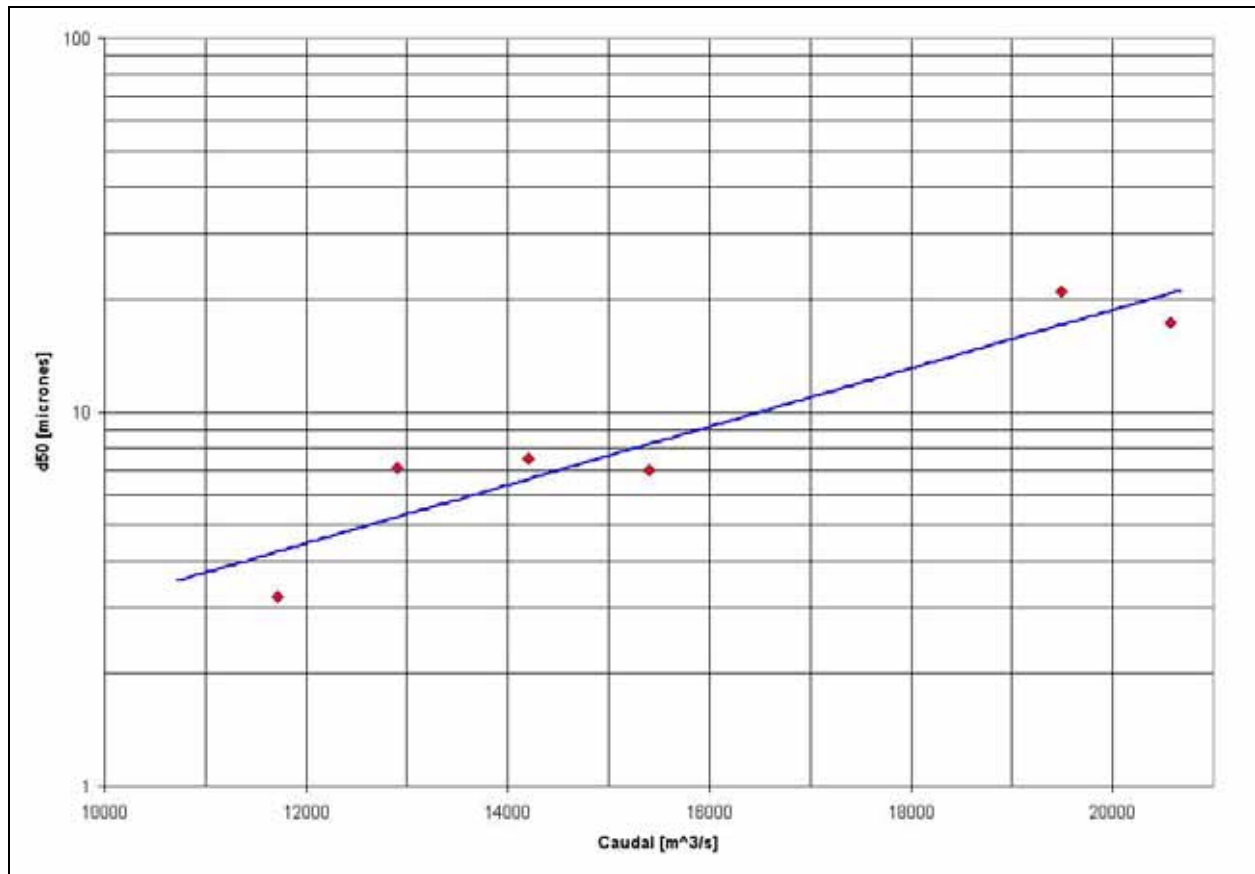


**Figura 3.2.2** Resultados de la calibración

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 3.2.3 se representa el diámetro medio en función de la tendencia 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:

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

donde el caudal se ingresa en m<sup>3</sup>/s y el d<sub>50</sub> 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 3.2.3** 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. En la figura 3.2.4 se observa su variación con el caudal entrante, donde se observa claramente que 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 año-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:

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

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

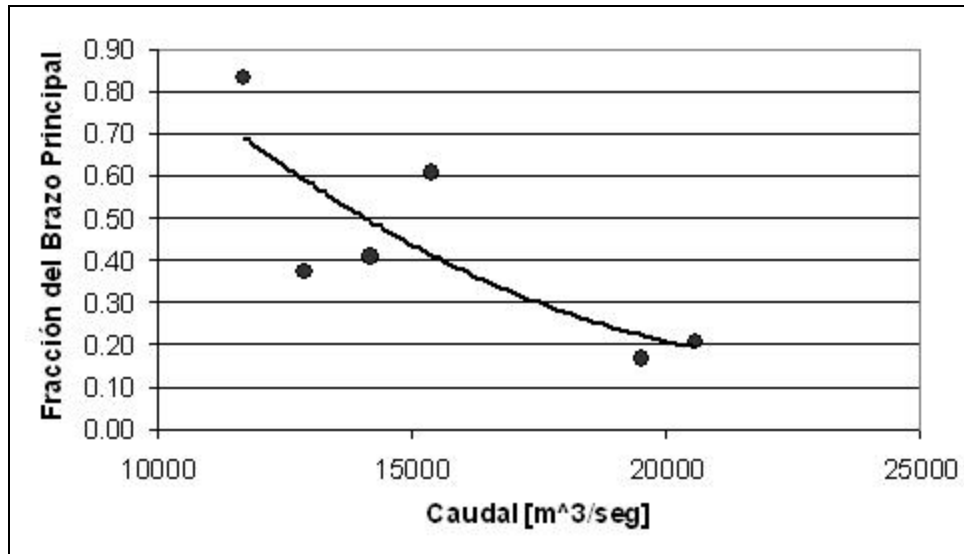


Figura 3.2.4 Fracción del Caudal Sólido Total del Brazo Principal

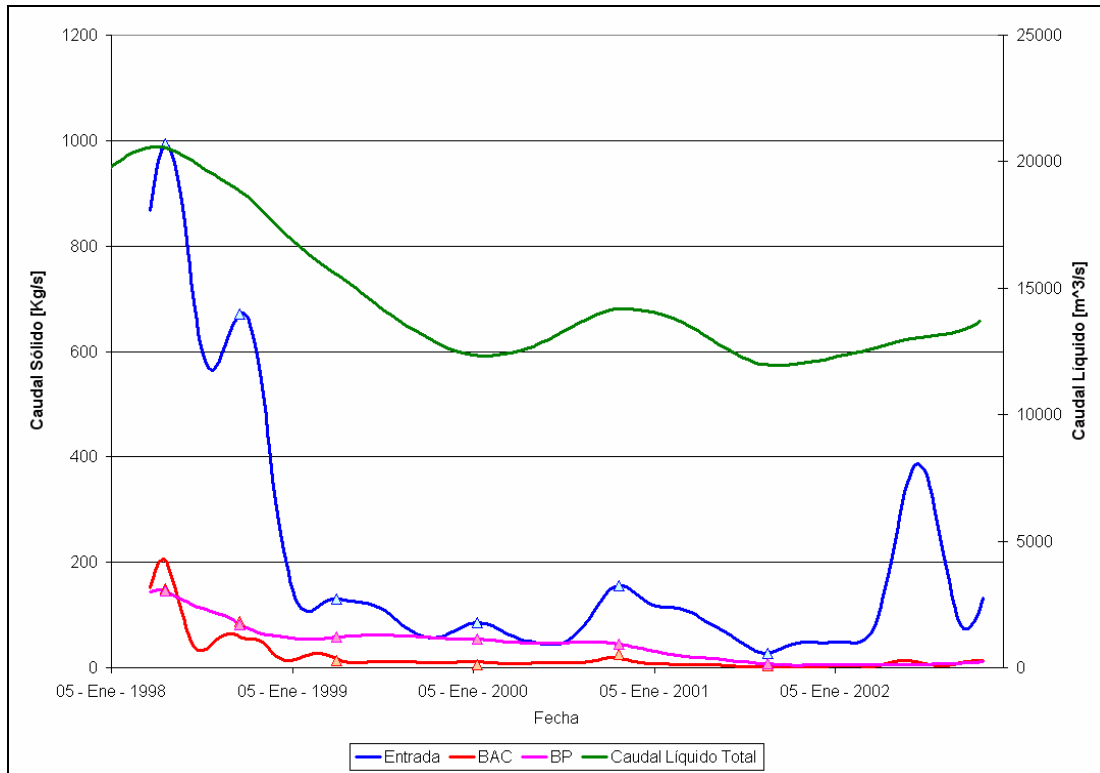
En la figura 3.2.5 y en la tabla 3.2.4 se presentan los caudales sólidos de salida obtenidos con el modelo para los escenarios de calibración que figuran en la tabla 3.2.3, si se utiliza el valor de diámetro y coeficiente de distribución obtenidos de las leyes propuestas. Los resultados se consideran satisfactorios, ya que las diferencias entre la salida medida y modelada prácticamente no superan el 20%.

Tabla 3.2.3 Escenarios de Calibración

Fecha	Caudal Sólido [kg/s]			
	Entrada	BAC	BP	Salida
24/Abr/1998	995	205	146	351
25/Oct/2000	155	17,9	45,1	63,0
14/Ene/2000	86,0	11,6	53,8	65,4
04/Abr/1999	130	16,6	57,7	74,3
21/Ago/2001	27,4	2,58	7,50	10,1
21/Sep/1998	671	58,3	82,6	140

Tabla 3.2.4 Resultados de la Calibración

Fecha	Caudal Sólido [kg/s]				
	Entrada	BAC	BP	Salida	Diferencia
24/Abr/1998	995	149	146	295	-56 (-16%)
25/Oct/2000	155	24,9	45,1	70,0	+7,0 (+11%)
14/Ene/2000	86,0	5,46	53,8	59,3	-6,1 (-9,3%)
04/Abr/1999	130	14,5	57,7	72,2	-2,1 (-2,8%)
21/Ago/2001	27,4	4,75	7,50	12,3	+2,1 (-21%)
21/Sep/1998	671	87,1	82,6	170	+30 (-21%)



**Figura 3.2.5** Resultados utilizando datos del ajuste

En la calibración del modelo no interviene el aporte marginal, dado que éste sedimenta completamente antes de la salida.

### 3.3 EXPLOTACIÓN

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

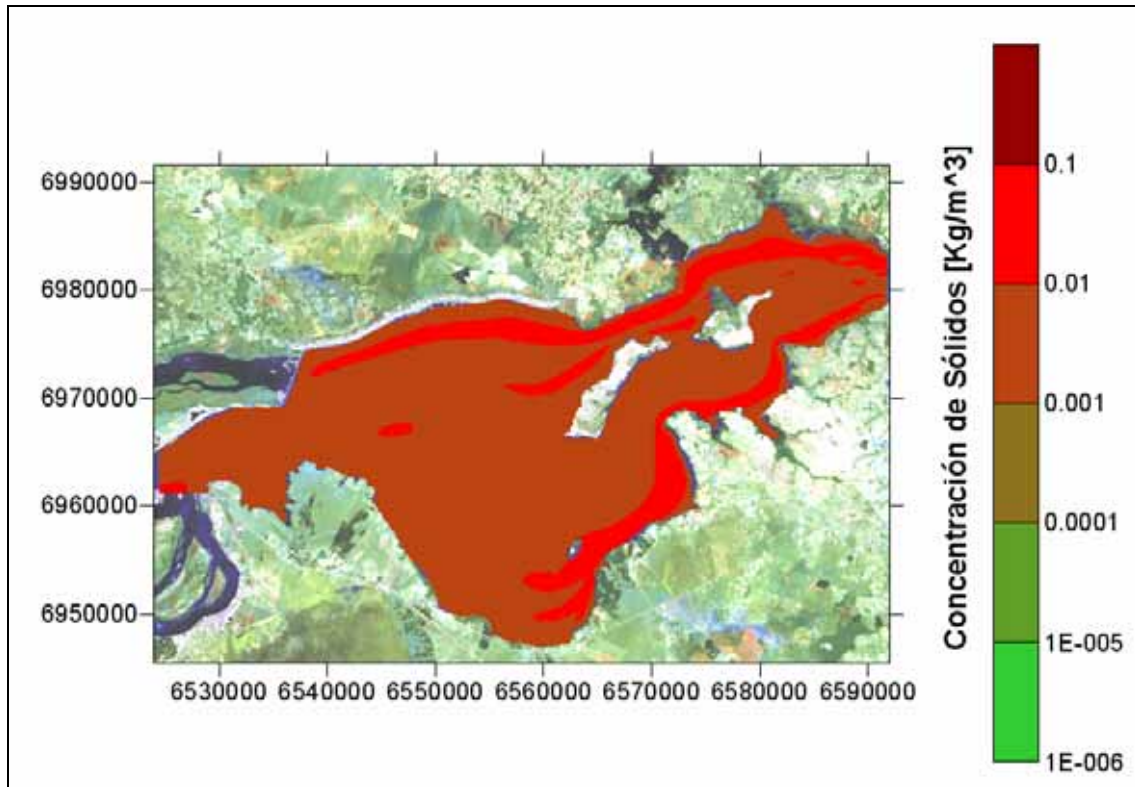
En lo que sigue se presentan y analizan los mapas de distribución de concentración y de tasas de sedimentación para condiciones actuales y para cota futura.

#### 3.3.1 DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN

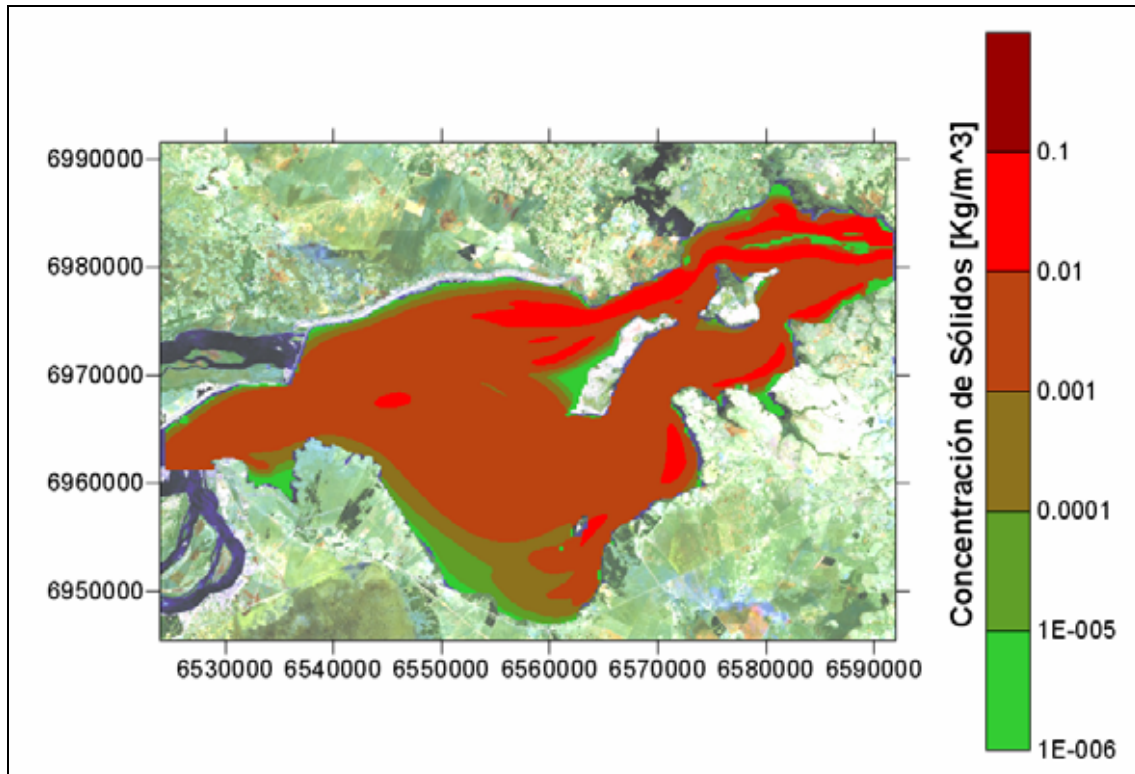
Se eligieron como escenarios de ensayo a EIV, EIII, y EI, que corresponden aproximadamente a los caudales representativos del rango de variabilidad (ver tabla 3.2.1): 10.000 (caudal bajo), 15.000 (caudal medio), y 20.000 m<sup>3</sup>/s (caudal alto).

En el caso del escenario de caudal bajo (figura 3.3.1) se observa una distribución en planta relativamente homogénea de la concentración de sólidos en suspensión. En el caso del escenario de caudal medio (figura 3.3.2), 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

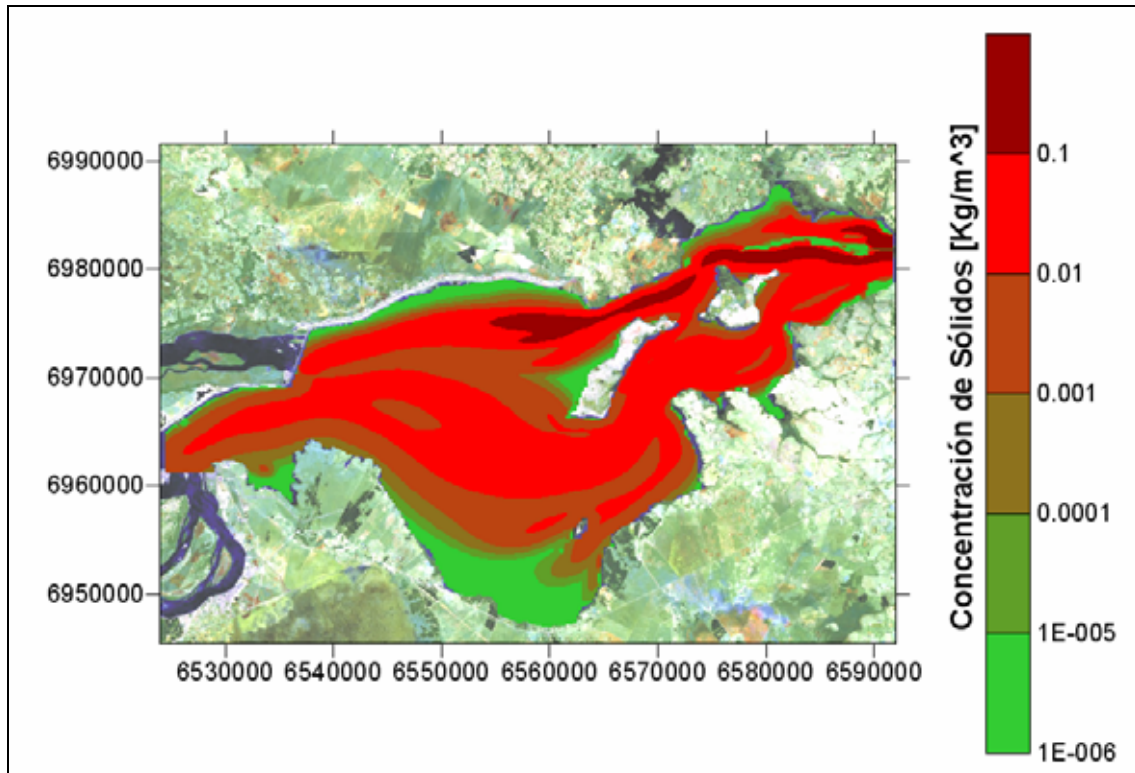
el escenario de mayor caudal (figura 3.3.3) se identifican dos canales preferenciales por los que circulan los sólidos en suspensión, los que coinciden con los viejos cauces del río Paraná, notándose entonces la disminución de la capacidad relativa de mezcla lateral debido al aumento de las velocidades de la corriente.



**Figura 3.3.1** Concentración de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal bajo



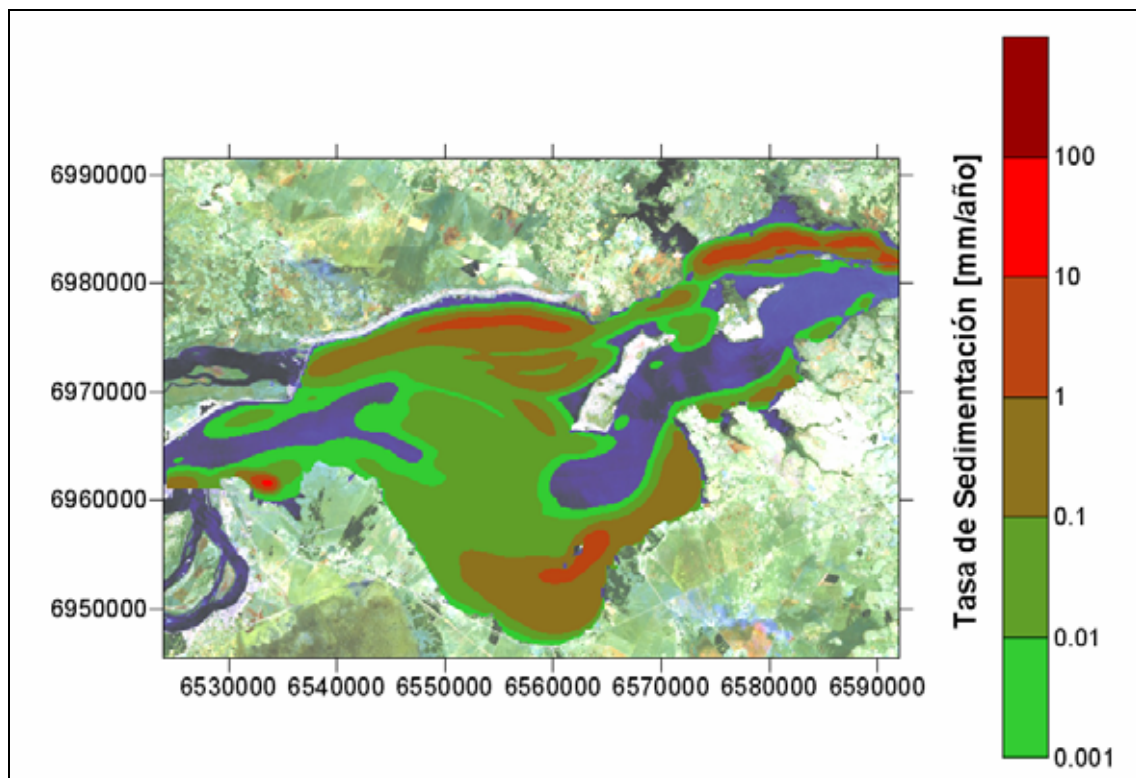
**Figura 3.3.2** Concentración de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal medio



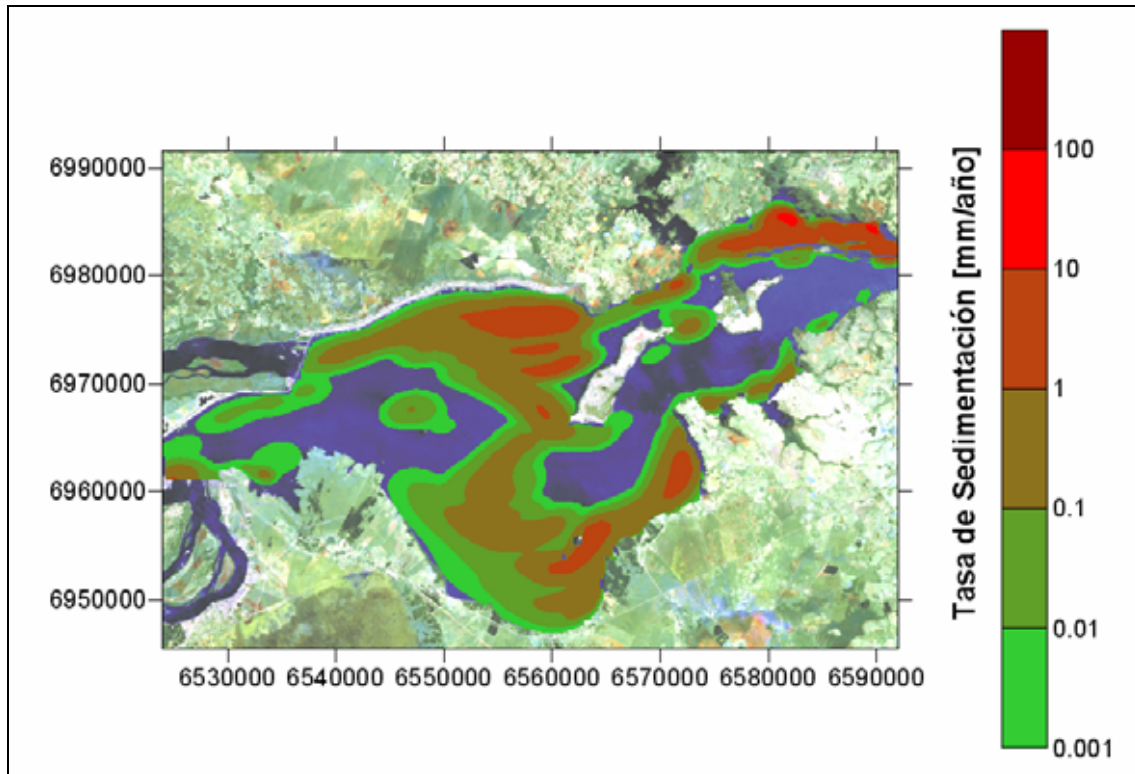
**Figura 3.3.3** Concentración de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal alto

### 3.3.2 TASAS DE SEDIMENTACIÓN

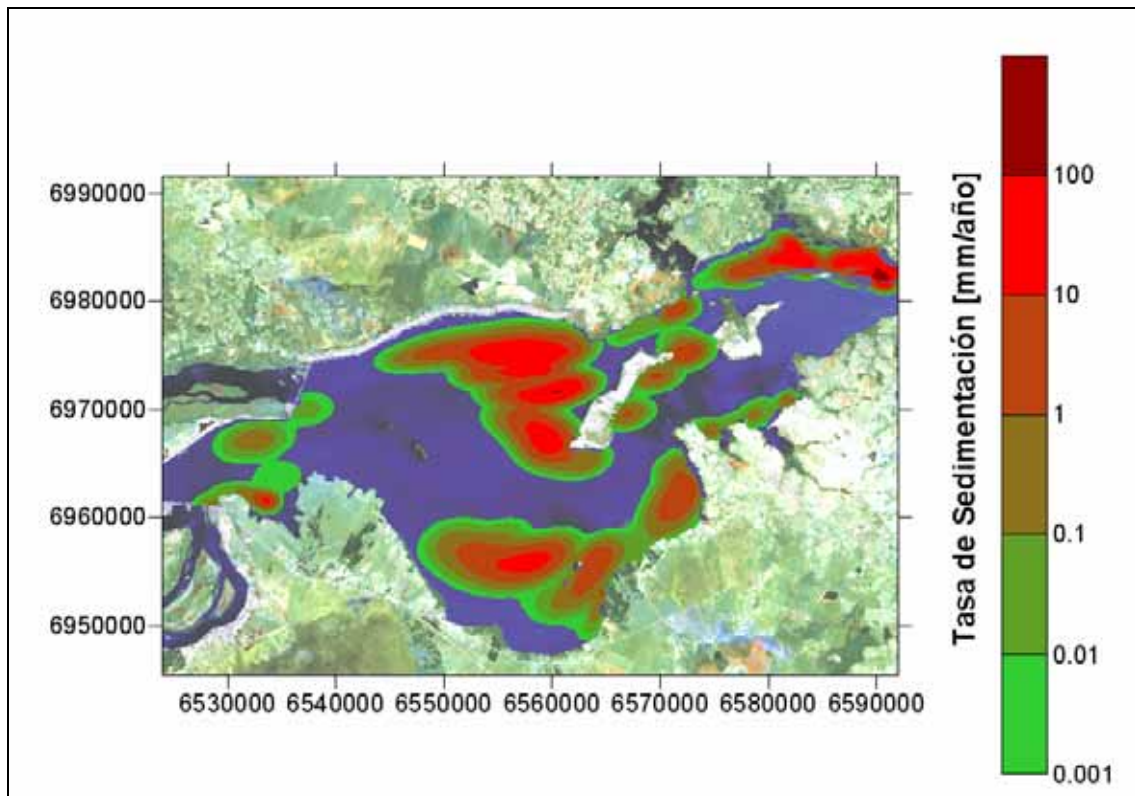
En el caso del escenario de caudal bajo (figura 3.3.4) se observa que las zonas de mayor sedimentación coinciden con la expansión del cauce y con la parte central del embalse, quedando la zona del antiguo cauce en el embalse con poca sedimentación. Para el escenario de caudal medio (figura 3.3.5) se 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 (figura 3.3.6) 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 3.3.4** Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal bajo



**Figura 3.3.5** Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal medio

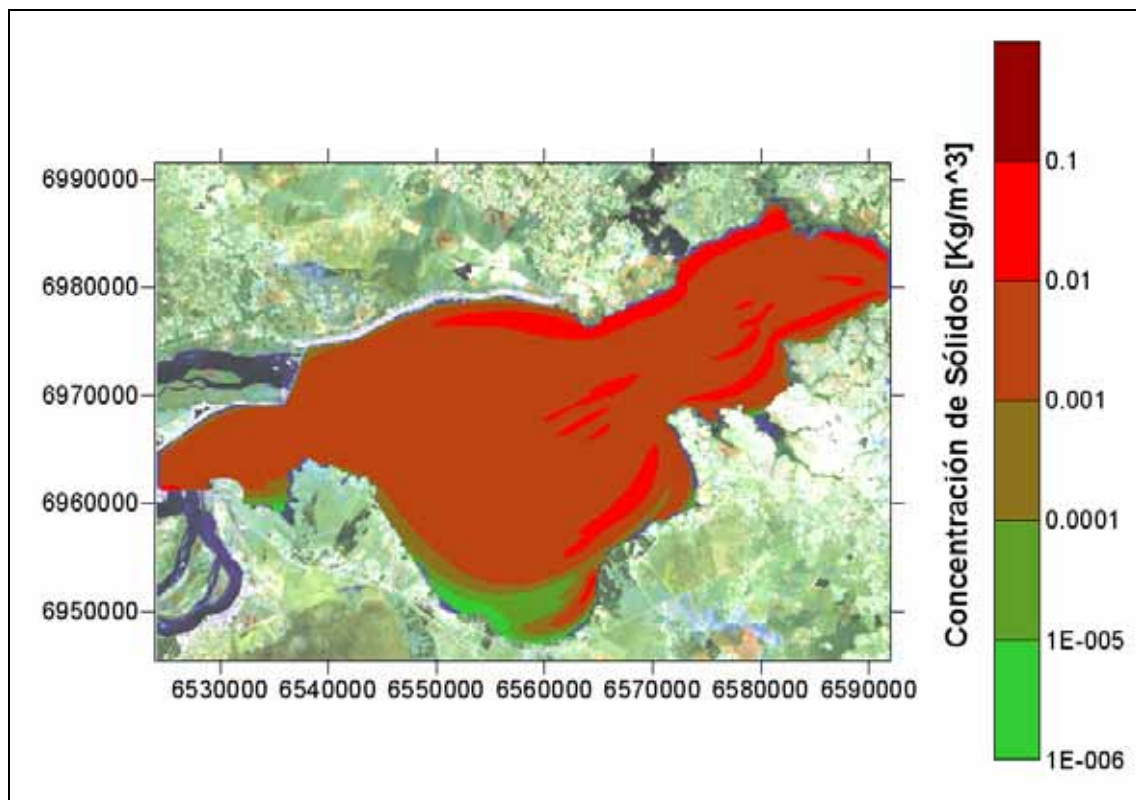


**Figura 3.3.6** Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 76 para caudal alto

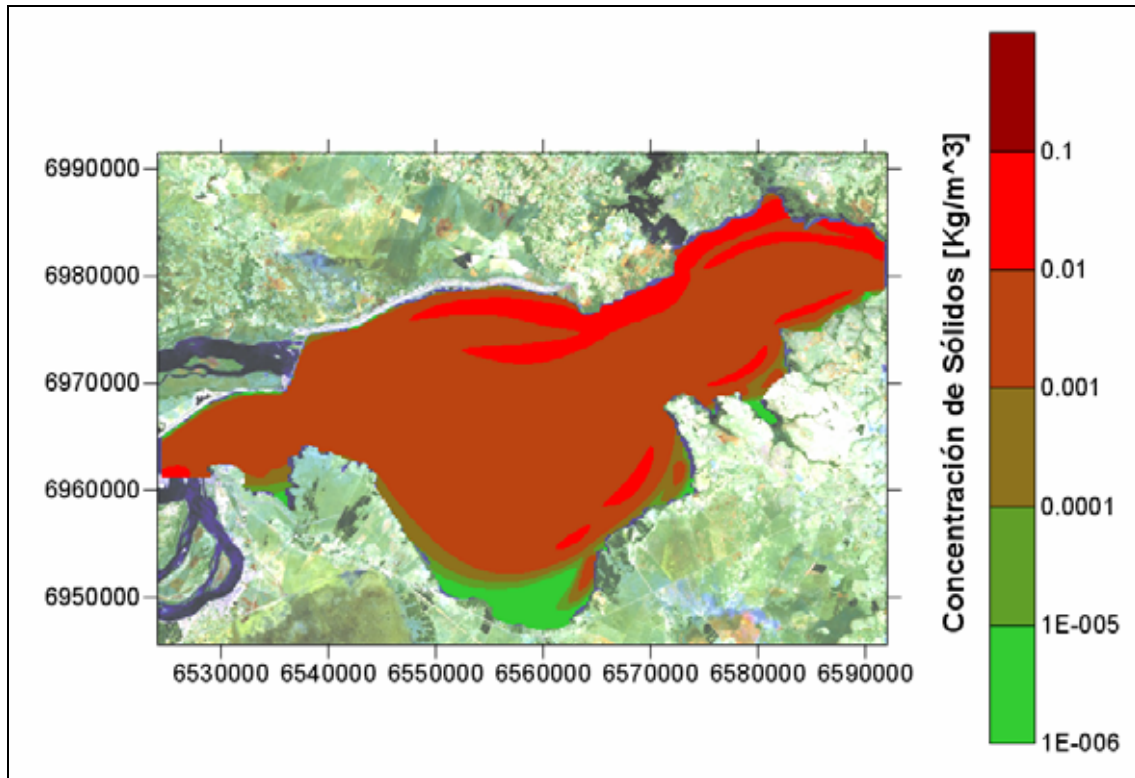
### 3.3.3 DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN A COTA FUTURA

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

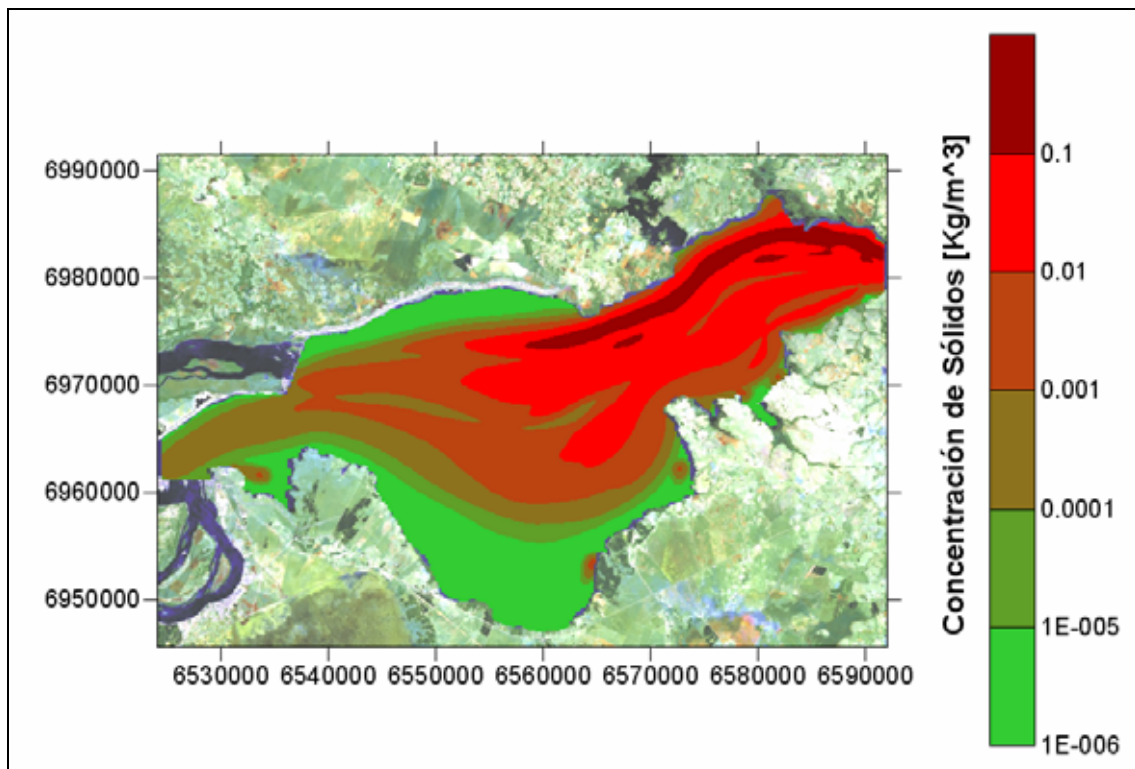
En el caso del escenario de caudal bajo (figura 3.3.7) también se observa una buena distribución en planta de la concentración de sólidos en suspensión, como sucede en cota 76m. Para el escenario de caudal medio (figura 3.3.8) no se observan cambios importantes en la concentración de sólidos en suspensión, 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 (figura 3.3.9) 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 3.3.7** Concentración de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal bajo



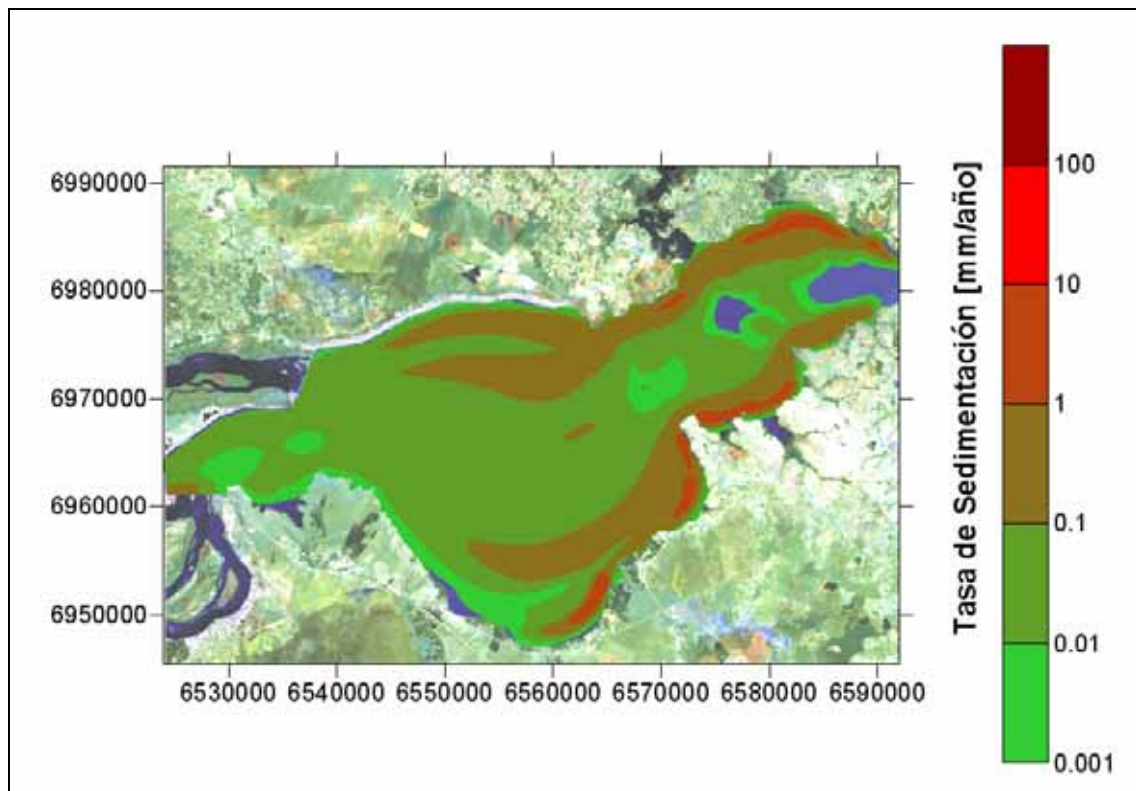
**Figura 3.3.8** Concentración de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal medio



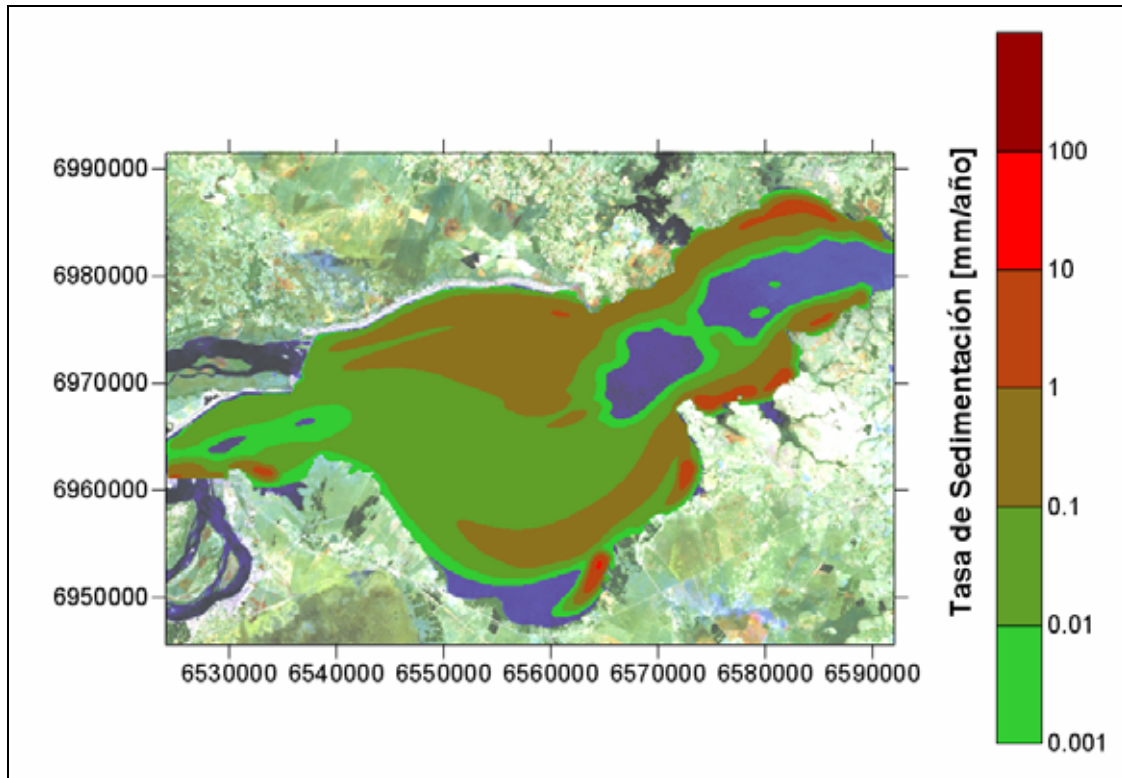
**Figura 3.3.9** Concentración de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal alto

### 3.3.4 TASAS DE SEDIMENTACIÓN A COTA FUTURA

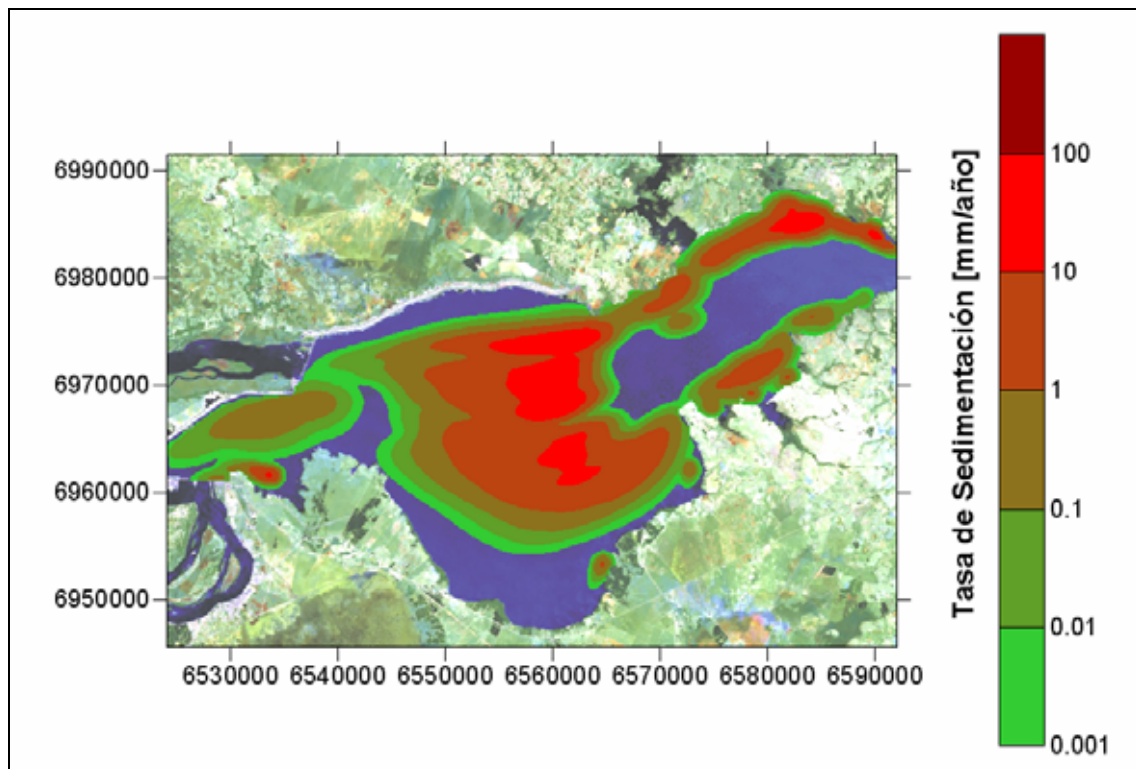
En el caso del escenario de caudal bajo (figura 3.3.10) se observa que la tasa de sedimentación se encuentra entre 0,1 y 1 mm/año en forma bastante uniforme sobre el embalse, con una pequeña zona sin sedimentación aguas arriba en forma de lengua. Para el escenario de caudal medio (figura 3.3.11) la tasa 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 (figura 3.3.12) 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 3.3.10 Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal bajo*



**Figura 3.3.11** Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal medio



**Figura 3.3.12** Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión a cota 83 para caudal alto

### 3.3.5 CONSISTENCIA CON SEDIMENTO DE FONDO

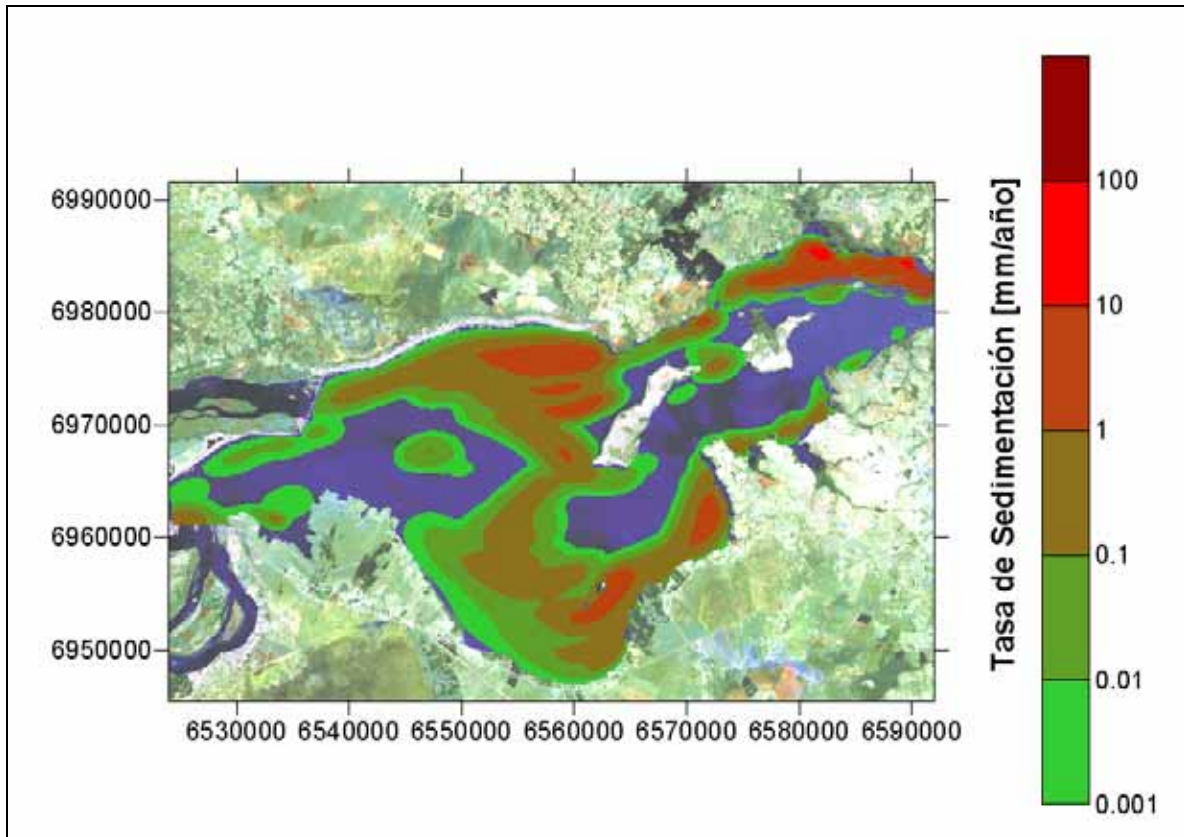
En la figura 3.3.13 se muestra una zonificación del embalse de Yacretá efectuada en base a datos granulométricos de muestras de sedimentos de fondo provistos por la EBY, que están agrupados en cuatro rangos de acuerdo a la clasificación granulométrica. Cada rango es cualitativo, y se corresponde con propiedades bien diferenciadas de los sedimentos. La zonificación fue efectuada tratando de respetar los tubos de flujo.

Como figura 3.3.14 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 3.3.5. 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 3.3.14), indicando precisamente la ausencia de sedimentación apreciable de sólidos suspendidos (material fino).
- La lengua de material grueso que penetra en el embalse (figura 3.3.13) se corresponde bien con la zona de ausencia de sedimentación de sólidos suspendidos (figura 3.3.14), que además constituye la traza del antiguo cauce principal del río.
- Las zonas con mayor sedimentación (figura 3.3.14) se corresponden con las de rangos de material fino (figura 3.3.13).
- La zona de material grueso cercana a la salida por el brazo principal (figura 3.3.13) tiene su correlato en una zona de ausencia de sedimentación (figura 3.3.14).



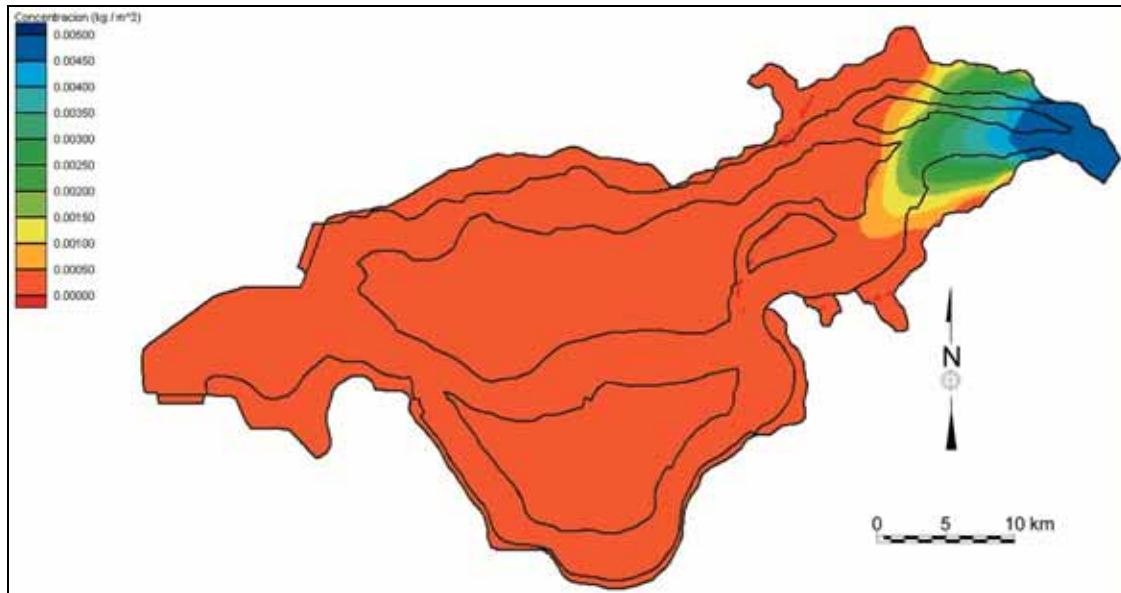
*Figura 3.3.13 Distribución granulométrica de sedimentos en planta según mediciones*



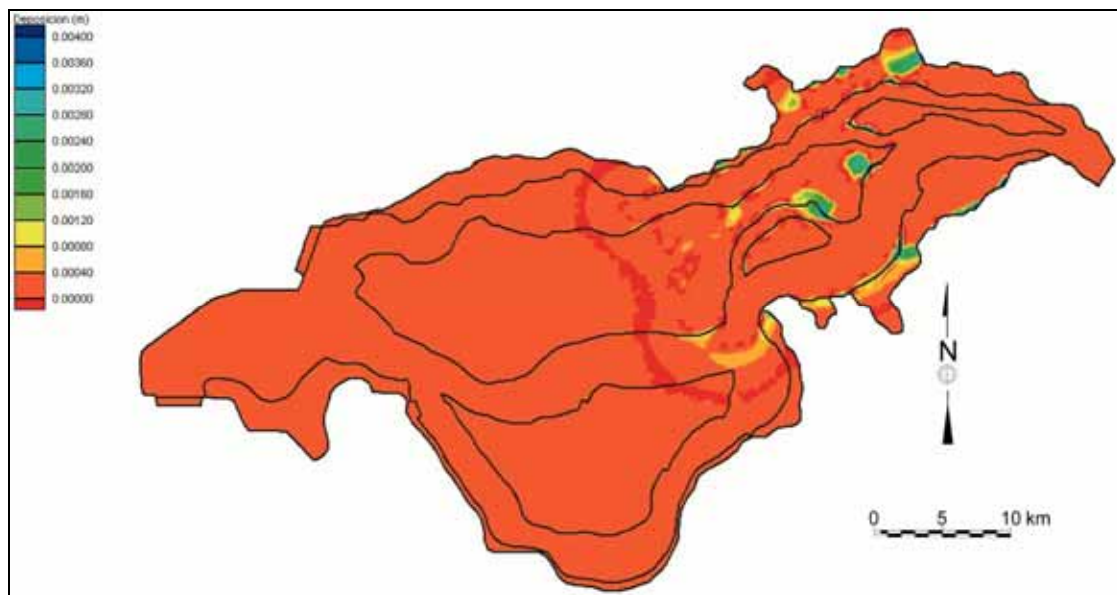
*Figura 3.3.14 Tasa de sedimentación de sólidos en suspensión EIII (caudal medio)*

### 3.3.6 COMPARACIÓN CON RESULTADOS PREVIOS

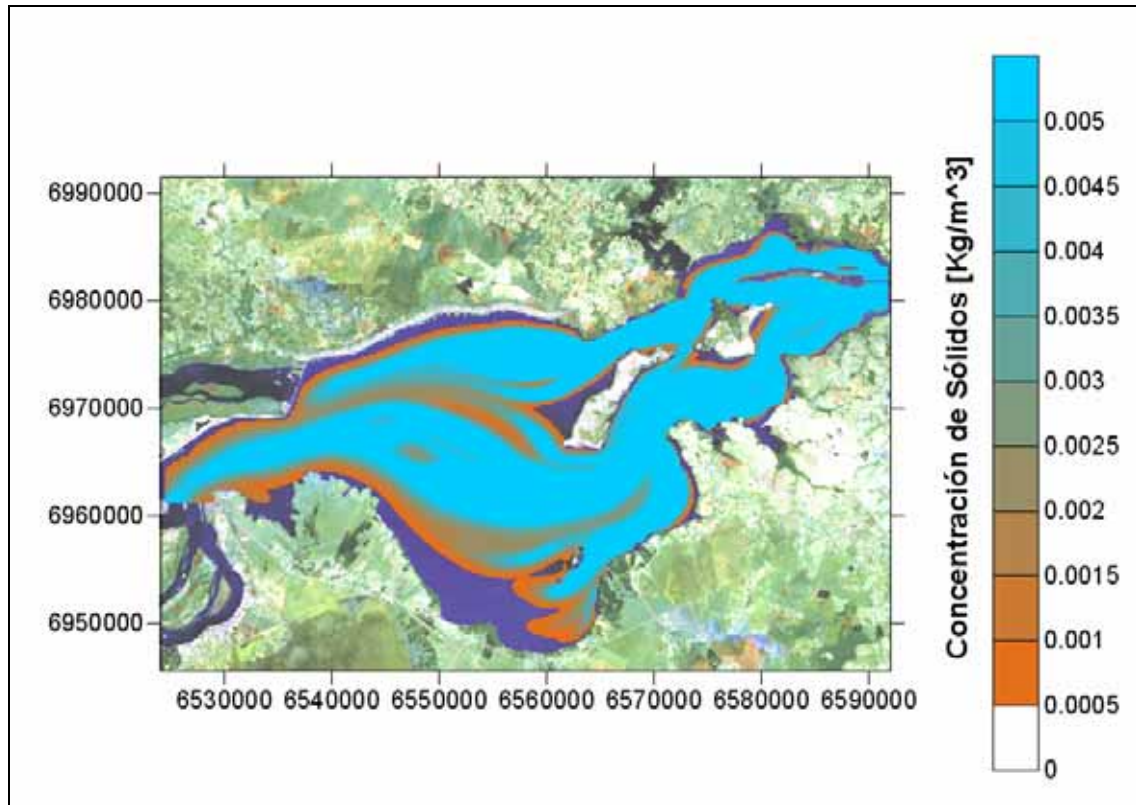
En el informe de NHC & EVARSA (2002) se presentan resultados de distribución de concentración de sólidos suspendidos y de tasas de sedimentación, discriminados por rango de tamaños. En las figuras 3.3.15 y 3.3.16 se muestran los correspondientes a la fracción fina para un caudal de alrededor de  $14000 \text{ m}^3/\text{s}$ , es decir, muy cercano al caudal medio de  $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Comparando, respectivamente, con las figuras 3.3.17 (que se corresponde con la figura 3.3.2 pero esta vez en la misma escala de niveles que la 3.3.15) y 3.3.15 se observan fuertes discrepancias, ya que las primeras muestran que se produce sedimentación total de los finos en la zona de transición. Se considera que esas diferencias provienen de un tratamiento demasiado simplificado por parte de NHC & EVARSA para los materiales finos que, de todos modos, siendo conservativo desde el punto de vista de la sedimentación, no afecta desde el punto de vista ingenieril las conclusiones allí vertidas.



**Figura 3.3.15** Distribución de concentración de sedimentos finos y un caudal de  $14000\ m^3/s$ , de acuerdo a NHC & EVARSA (2002)



**Figura 3.3.16** Distribución de tasa de sedimentación de sedimentos finos y un caudal de  $14000\ m^3/s$ , de acuerdo a NHC & EVARSA (2002)



*Figura 3.3.17* Distribución de sólidos en suspensión para caudal medio

## 4 PRODUCTOS Y CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de la tesis se han generado los siguientes productos, debidamente validados:

- Un modelo hidrodinámico del embalse de Yacyretá.
- Un modelo de transporte de sólidos suspendidos en el embalse para las variaciones de baja frecuencia (tendencias), es decir, no apto para simular eventos.

Dichos productos constituyen herramientas que la EBY dispone para gestionar el embalse.

La aplicación de los modelos permitió obtener las siguientes conclusiones, que constituyen conocimiento útil para la administración del embalse:

- La elevación del nivel del embalse desde cota 76 m a 83 m habrá de causar 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.
- Los tiempos de residencia en la zona central del embalse, que actualmente oscilan entre 2 y 6 días, aumentarán a entre 4 y 12 días. En las zonas marginales, por su parte, los tiempos de residencia pasarán de entre 5 y 30 días a entre 10 y 60 días. Es decir, habrá prácticamente una duplicación de los tiempos de residencia con la elevación del nivel del embalse de cota 76 a 83 metros, lo cual constituye información significativa a los fines de la calidad. De todos modos, estos valores del tiempo de residencia son a priori lo suficientemente bajos como para esperar que se desarrollen problemas de eutrofización.
- La distribución de velocidades en el embalse es sensible al modelo numérico del terreno. En consecuencia, es conveniente actualizarlo periódicamente, en función de la tasa de sedimentación calculada en este estudio.
- La mezcla lateral es relativamente débil frente a la advección, por lo que los sólidos suspendidos tienden a desplazarse por los corredores de flujo donde son inyectados al embalse. En particular, los descargados en una margen se desplazan esencialmente adyacentes a esa margen.
- Los sólidos descargados en la margen tienden a sedimentarse en el embalse, sin llegar hasta la zona de vertederos.

El programa de estudios continúa actualmente, con las siguientes actividades:

- Modelo de transporte de fósforo total, dirigido a evaluar el problema de la eutrofización.
- Modelo de metales, que apunta a estudiar el problema de la acumulación de tóxicos.
- Modelo bacteriológico, destinado a analizar la calidad del agua en las adyacencias de las zonas urbanizadas (Posadas y Encarnación), para lo cual se está implementando un modelo hidrodinámico de mayor escala de resolución.

## REFERENCIAS

1. Abbott, M., 1979, *Computational Hydraulics*, Pitman, Boston.
2. EBY/INRS-ETA, 2002, *Modelo Hidrodinámico Bidimensional del Sistema Fluvial del Río Paraná anexo a la zona del Complejo Hidroeléctrico Yacyretá*.
3. Menéndez, A.N., 1985, *Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre*, Informe interno LHA-INCYTH-S5-016-85, Ezeiza.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Álvarez Tagliabue, C.U., Menéndez, A.N., 2003, *Modelación hidrodinámica del embalse de Yacyretá*, Informe INA-LHA 01-224-03.
8. Álvarez Tagliabue, C.U., Menéndez, A.N., 2003, *Modelo Hidrodinámico Global del embalse de Yacyretá*, Informe INA-LHA 02-225-03.
9. Álvarez Tagliabue, C.U., Menéndez, A.N., 2003, *El cambio hidrodinámico por la elevación del nivel*, Informe INA-LHA 02-224-03.
10. Álvarez Tagliabue, C.U., Menéndez, A.N., 2004, *Campaña de mediciones de velocidades*, Informe INA-LHA 03-224-03.
11. Álvarez Tagliabue, C.U., Menéndez, A.N., 2004, *Modelo de transporte de sólidos suspendidos en el embalse de Yacyretá*, Informe INA-LHA 04-225-04.
12. 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
13. 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.
14. Broomhead, D. and King, G., 1986, *Extracting qualitative dynamics from experimental data*. *Physica D*, 20, 217-236
15. Broomhead, D.S., and G. King, 1986, *On the qualitative analysis of experimental dynamical systems*, in *Nonlinear Phenomena and Chaos*, S. Sarkar (Ed.), Adam Hilger, Bristol, 113-144.
16. 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. (<http://www.atmos.ucla.edu/tcd/ssa/index.html>)
17. Menéndez, A.N., 1986, *Simulación numérica de la dispersión de contaminantes en regiones localizadas*, Informe INA-LHA 066-01-86, diciembre.
18. Carreras P.E., Menéndez A.N., 1990, *Mathematical simulation of pollutant dispersion*, *Ecological Modelling*, 52, 29-40.