



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS
MINISTERIO DE INFRAESTRUCTURA
REPÚBLICA ARGENTINA



*Comisión Mixta Argentino Paraguaya
del Río Paraná*

ESTUDIO DE APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO ITATÍ-ITACORÁ

Tercer Informe Parcial



Proyecto LHA370
Informe LHA 05-370-18
Ezeiza, Junio de 2018

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Ing. Pablo SPALLETTI

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO (Orden alfabético)

INA

Ing. Nicolás D. BADANO

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

Ing. Emilio LECERTÚA

Ing. Nicolás TOMAZÍN

Paraguay

Ing. Mag. Cristian ESCOBAR JARITÓN

Ing. Benito PEREIRA

ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO ITATÍ-ITACORÁ

Tercer Informe Parcial

RESUMEN

Se determina la distribución de tasas de deposición de sedimentos fino en suspensión dentro del embalse de Itatí-Itacorá. Se evalúa la erosión de fondo esperable al pie de la presa de Itatí-Itacorá por el corte de transporte de sedimentos. Se calculan hidrogramas de aporte al embalse de Itatí-Itacorá para eventos de larga duración. Se analiza la falla del puente sobre el arroyo Iribú Cuá perteneciente a la Ruta Nacional 12.

Descriptores temáticos: Modelos hidrosedimentológicos. Sedimentación en embalses. Erosión al pie de presa. Hidrogramas de aporte.

Descriptores geográficos: Río Paraná, Río Paraguay, Cierre Itatí-Itacorá, Embalse de Yacyretá, Argentina, Paraguay.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICOS	6
2.1	Deposición de sedimentos finos en el embalse Itatí-Itacorá	6
2.1.1	Planteo del problema	6
2.1.2	Antecedentes	6
2.1.3	Implementación del modelo	8
2.1.4	Resultados	10
2.1.5	Sensibilidad de los resultados	13
2.2	Erosión aguas abajo del cierre Itatí-Itacorá	14
2.2.1	Planteo del problema	14
2.2.2	Análisis de antecedentes	14
2.2.3	Evolución para fondo no consolidado	18
3	APORTE HIDROLÓGICO	24
3.1	Consideraciones generales	24
3.2	Redefinición de subcuencas	24
3.3	Modelación hidrológica	26
3.3.1	Características de las subcuencas	26
3.3.2	Tormenta de diseño	26
3.3.3	Método de pérdidas	26
3.3.4	Método de transformación precipitación-escorrentía	28
3.4	Resultados	29
3.5	Falla del puente sobre la Ruta 12	33
4	CONCLUSIONES	38

5 REFERENCIAS

40

1 INTRODUCCIÓN

El proyecto Itatí-Itacorá es un aprovechamiento hidroeléctrico de llanura ubicado aguas abajo de la presa de Yacyretá, en el límite entre Argentina y Paraguay, y cercano a las ciudades de Itatí, sobre la margen argentina, e Itacorá, sobre la margen paraguaya. Al ubicarse aguas abajo de la presa de Yacyretá, podrá ser utilizado como embalse compensador de esta.

La COMIP (Comisión Mixta Argentino Paraguaya del Río Paraná) ha encargado al INA, a través del CEED, los estudios hidráulicos para el anteproyecto del emprendimiento. Este estudio cuenta además con la colaboración de profesionales paraguayos contratados por la COMIP, y la discusión permanente con personal técnico de la COMIP y de EBISA.

Los principales objetivos del estudio son los siguientes:

- Determinar las áreas inundadas por el futuro embalse, para ser utilizadas en el estudio de impacto ambiental.
- Determinar las curvas clave altura-caudal en la sección de cierre y en la restitución de la presa de Yacyretá, para ser utilizadas en el análisis energético.
- Determinar la acción del oleaje sobre las márgenes del embalse, de modo de establecer el riesgo de erosión.
- Cuantificar el aporte hidrológico desde la margen derecha (Paraguay) e izquierda (Argentina), de modo de analizar sus efectos y su eventual conducción en caso de ser interceptado.
- Analizar la sedimentación en el futuro embalse.
- Analizar la eventual perturbación de la dinámica hidrosedimentológica aguas abajo del futuro cierre.

En el Primer Informe Parcial se determinaron los efectos de remanso que provocaría el cierre Itatí-Itacorá (cuantificados a través de las áreas de inundación, los perfiles longitudinales del pelo de agua y las curvas altura-caudal en la restitución de Yacyretá), se efectuó un análisis para establecer la curva altura-caudal más confiable para la sección Itatí-Itacorá, se analizó el clima de olas que se generará en el embalse de Itatí-Itacorá, se llevó a cabo una estimación de la consecuente erosión potencial sobre las márgenes, y se determinaron hidrogramas de aporte hidrológico desde la margen argentina hacia el río Paraná.

En el Segundo Informe Parcial se establecieron las curvas clave altura-caudal en las posibles secciones de implantación del cierre Itatí-Itacorá, los tiempos de recurrencia para distintos caudales pico, la permanencia de los caudales diarios, las curvas caudal-nivel con el embalse Itatí-Itacorá para distintas localidades, los perfiles longitudinales del nivel de agua para condiciones naturales y en situación con presa para distintos caudales, el efecto de Itatí-Itacorá sobre la restitución de la Central de Yacyretá para niveles de embalse intermedios entre 59.0 m y 61.0 m, los perfiles longitudinales asociados a la CMP

correspondientes a las distintas alternativas de cierres, y la distribución lateral de velocidades y caudales específicos en las secciones transversales de ambas alternativas de cierre. Adicionalmente, se efectuó una predicción del oleaje para las diferentes alternativas de cierre, se analizó la compatibilidad entre las series de intensidades de viento en las estaciones San Cosme y Posadas, se estimó el oleaje asociado a un temporal como el del 25 de abril de 2017, y se analizó la compatibilidad entre los registros de erosión costera para el embalse de Itaipú y los cálculos efectuados para el embalse de Itatí-Itacorá. Finalmente, se calcularon los hidrogramas de aporte hidrológico desde la margen paraguaya hacia el río Paraná, considerando tormentas de larga duración, e incluyendo el cálculo de hidrogramas a pie de presa para las alternativas de cierre 1A, 1B y 2B.

En este Tercer Informe Parcial se presentan los siguientes resultados:

- Se determina la distribución de tasas de deposición de sedimentos fino en suspensión dentro del embalse de Itatí-Itacorá.
- Se evalúa la erosión de fondo esperable al pie de la presa de Itatí-Itacorá por el corte de transporte de sedimentos.
- Se calculan hidrogramas de aporte al embalse de Itatí-Itacorá para eventos de larga duración. Se analiza la falla del puente sobre el arroyo Iribú Cuá perteneciente a la Ruta Nacional 12.

2 ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICOS

2.1 Deposición de sedimentos finos en el embalse Itatí-Itacorá

2.1.1 Planteo del problema

Si bien la cadena de embalses brasileños y el embalse de Yacyretá constituyen reservorios de deposición de sedimentos, que capturan una parte significativa del material en suspensión (carga de lavado), todavía queda un remanente que se descarga hacia aguas abajo de Yacyretá, capaz entonces de ser capturado por el embalse de Itatí-Itacorá. Además, hay aportes laterales de sólidos transportados por la escorrentía. Se consideran dominantes los aportes de las subcuencas de margen derecha, dado que sus áreas de drenaje son mucho mayores que las de margen izquierda.

En lo que sigue se estudia el problema de la deposición de los sedimentos finos aportados al embalse de Itatí-Itacorá mediante modelación numérica.

2.1.2 Antecedentes

El antecedente más cercano para este análisis corresponde al estudio del transporte y deposición de sólidos suspendidos en el embalse Yacyretá realizado por el INA (2004). En dicho estudio se utilizaron mediciones de concentraciones de sólidos suspendidos en varias estaciones y condiciones del río para ajustar un modelo sedimentológico de tipo lagrangeano, montado sobre un modelo hidrodinámico bidimensional. De estos análisis surgieron una serie de elementos aplicables al estudio del embalse Itatí-Itacorá.

En lo referente a la caracterización del sedimento suspendido, en ese estudio se halló una relación entre el caudal del río y el diámetro medio d_{50} del sedimento en el tramo entre la estación Calendaria y el cierre de Yacyretá, la cual se presenta en la **Figura 2.1**. Se observa que el diámetro del sedimento crece con el caudal, y que para caudales cercanos al medio el d_{50} es del orden de 7 μm .

Otro resultado relevante es el caudal sólido de sedimento suspendido que fluye desde el embalse Yacyretá. Este se cuantificó para distintas fechas, obteniéndose los resultados mostrados en la **Tabla 2.1**.

La variabilidad del caudal sólido estimado responde esencialmente a variaciones en el caudal líquido del río para los distintos instantes. En particular, para las fechas de Abr/1999, Ene/2000 y Oct/2000 el caudal en el río fue del orden del valor medio. Entonces, se tomó un promedio de los valores correspondientes a esas fechas como representativo de un caudal sólido saliente del embalse Yacyretá para condiciones hidrológicas medias, resultando de 67 kg/s.

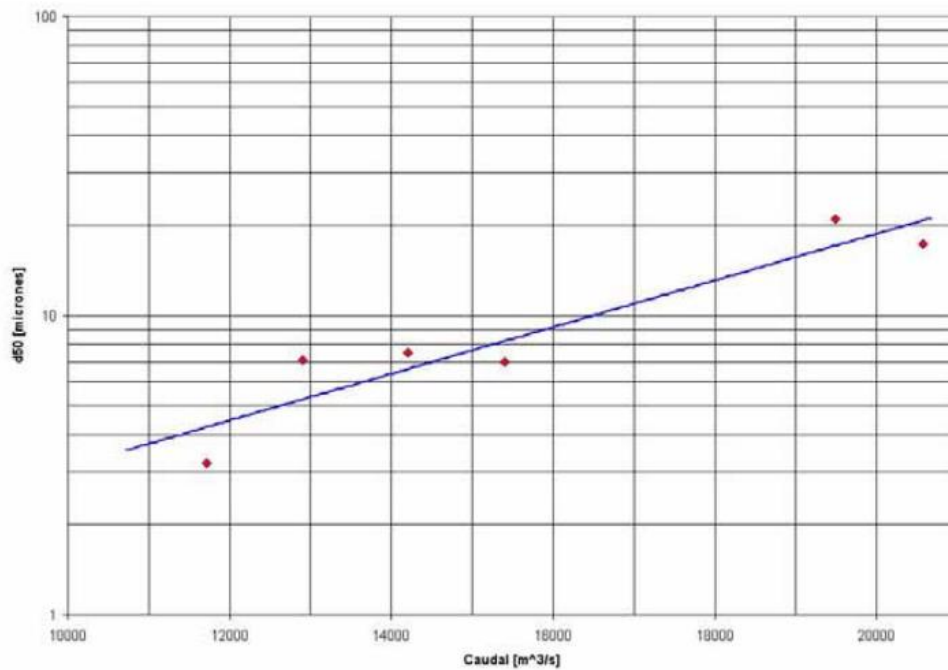


Figura 2.1. Relación entre el caudal del Paraná y el diámetro medio del sedimento suspendido (INA, 2004).

Tabla 2.1. Caudal sólido suspendido entrante y saliente del embalse Yacyretá (INA, 2004).

Fecha	Caudal Sólido Saliente de Yacyretá (kg/s)	Caudal Líquido Saliente de Yacyretá (m ³ /s)
24/Abr/1998	345.17	20574
21/Sep/1998	136.64	19496
04/Abr/1999	72.19	15400
14/Ene/2000	65.62	11711
25/Oct/2000	63.95	14200

Existe otro informe antecedente realizado por NHC & EVARSA (2002), en el cual se calcularon por distintos métodos las tasas de erosión específicas para la subcuenca del río Paraná comprendida entre los cierres Itaipú y Yacyretá. Los resultados presentados en dicho informe se resumen en la **Tabla 2.2**. Se observa una gran variabilidad en las estimaciones por distintos métodos. Se considera que estas tasas específicas pueden ser representativas para la subcuenca ubicada entre Yacyretá y el cierre Itatí-Itacorá, aunque posiblemente inferiores dada la menor pendiente del terreno en este tramo. Dado que dos metodologías diferentes (Walling & Webb y Fleming & Kadhimi) proveyeron resultados similares, y que además se esperarían menores tasas en esta zona, se seleccionó como representativo un valor menor al promedio, a saber, 100 ton/km²/año.

Tabla 2.2. Tasas de erosión específicas para la subcuenca del río Paraná entre Itaipú y Yacyretá (NHC & EVARSA, 2002).

Método	Tasa de Erosión Específica [ton/km ² /año]
Fournier	300
Walling y Webb	75
Fleming y Kadhim	57
Varoni	200

2.1.3 Implementación del modelo

Para simular el transporte y deposición de sedimento suspendido en el embalse de Itatí-Itacorá, se implementó un modelo hidrodinámico bidimensional con un modelo sedimentológico acoplado utilizando el código Delft3D.

El módulo hidrodinámico del Delft3D resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas (RANS) para un fluido incompresible bajo la hipótesis de aguas poco profundas. Es un código multi-dimensional, que puede realizar cálculos en 2D y 3D. En el modo 2D, utilizado en este estudio, el código resuelve un set de tres ecuaciones: una ecuación de continuidad y dos ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento en el plano horizontal. Estas ecuaciones son resueltas usando el método de las diferencias finitas con un esquema ADI (implícito en direcciones alternadas) sobre una malla estructurada de cuadrángulos con un sistema de coordenadas curvilíneo.

El módulo sedimentológico puede resolver transporte de fondo y en suspensión de sedimentos no cohesivos y el transporte en suspensión de sedimentos cohesivos. Para el presente problema se resolvió el transporte fino en suspensión de una fracción de sedimento cohesivo. El código calcula este transporte a través de una ecuación de advección-difusión, resuelta sobre la misma malla del cálculo hidrodinámico. Dicha ecuación presenta términos de deposición y resuspensión, modelados a través de la formulación de Parthenaides-Krone. El código simula la evolución morfológica modificando el nivel de fondo en cada paso de tiempo de acuerdo a la cantidad de sedimento depositado en el fondo.

La batimetría del modelo se construyó combinando el MDE (Modelo Digital de Elevación) del modelo hidrodinámico MOAGAB (ver Primer Informe Parcial), que se extiende desde el cierre Yacretá hasta la estación Ita Ibaté, con el MDE generado para el modelo de olas (ver Primer Informe Parcial) desde aguas abajo de esta estación. La batimetría obtenida se presenta en la **Figura 2.2**. Allí también se observa el dominio del modelo, que se extiende desde la presa Itatí-Itacorá, en su alternativa de cierre 1A, hasta la presa Yacyretá, incluyendo un tramo de 6 km del brazo Aña Cuá. Este dominio de cálculo se discretizó en una malla de celdas cuadradas de 200 m de lado.

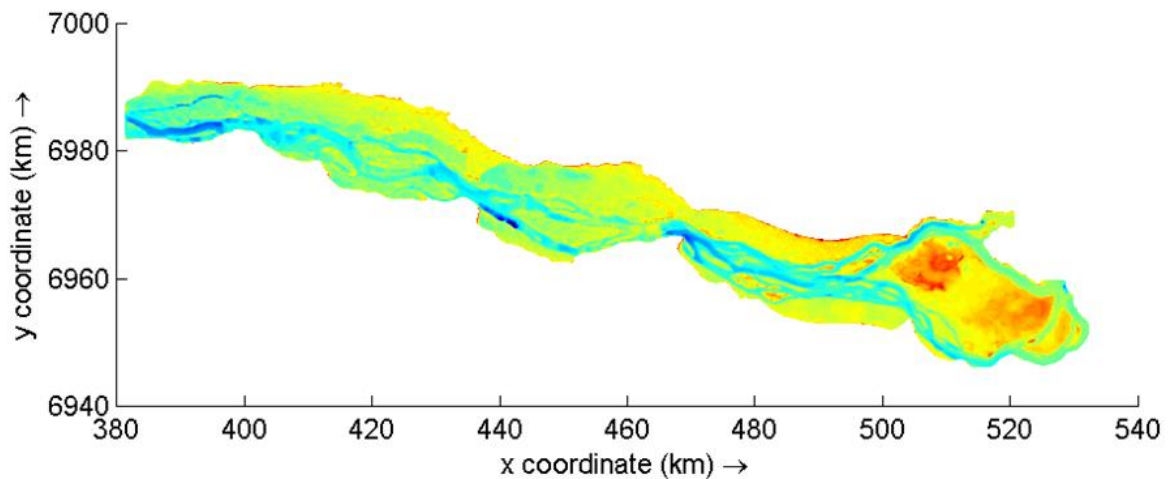


Figura 2.2. Dominio y batimetría del modelo hidrosedimentológico del embalse Itatí-Itacorá.

Como se verá a continuación, la tasa de deposición de sedimentos finos es muy baja, por lo que el proceso de sedimentación es muy lento en relación al ciclo hidrológico. Como es sabido, cuando la escala de tiempo de un forzante (en este caso el ciclo hidrológico) es muy baja en relación a la escala de tiempo del sistema (en este caso, el tiempo de incremento del nivel de fondo), el efecto puede estimarse utilizando valores medios del forzante. En particular, entonces, el efecto acumulativo de la sedimentación puede estimarse utilizando el caudal medio.

Se realizaron simulaciones numéricas a caudal constante, imponiendo como condición en el borde de agua arriba un caudal total de $14.735 \text{ m}^3/\text{s}$ (representativo de condiciones medias), repartido entre los brazos Principal y Aña Cuá de acuerdo a la política de operación de Yacyretá, que indica que una partición de $13.735 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.000 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. En el borde de aguas abajo se fijó un nivel constante e igual al de diseño (59m o 61m, dependiendo del escenario).

Como caudal sólido en la descarga de Yacyretá se adoptó un valor de 67 kg/s , de acuerdo a lo indicado en la sección anterior. Al dividir esta carga por el caudal líquido se obtuvo una concentración de $4,6 \text{ g/m}^3$, que es el valor que se fijó como condición de borde en la entrada.

Se introdujo también al modelo un aporte sólido lateral estimado para las principales subcuencas de margen izquierda: Yabebry, Jaguary, Atinguy y Aguapey. Al multiplicar el área de cada subcuenca por la tasa de $100 \text{ ton/km}^2/\text{año}$ establecida en la sección anterior, se obtuvieron las cargas sólidas que se presentan en la **Tabla 2.3**.

Tabla 2.3. Aporte sólido para las subcuencas de margen izquierda.

Subcuenca	Área (km ²)	Tasa de erosión (Ton/km ² /año)	Aporte sólido (kg/s)
Yabeyry	1657	100	5.25
Jaguary	423	100	1.34
Atinguy	1107	100	3.51
Aguapey	1411	100	4.48

En el caso de las subcuencas Yabeyry y Jaguary, que descargan al embalse en la zona modelada, los aportes se introdujeron como una carga sólida en el punto en que estos arroyos ingresan al embalse. En el caso del Atinguy y el Aguapey, que descargan en el Brazo Aña Cuá aguas arriba del borde superior del modelo, la carga sólida fue repartida de manera uniforme en todo el ancho del río. De esta manera, la concentración de sedimento en el borde del modelo del brazo Aña Cuá resultó incrementada de 4,6 g/m³ (correspondiente al vertido por Yacyretá) a 12.6 g/m³.

Se utilizó para todo el embalse un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,035, que es el valor medio utilizado en el modelo unidimensional, obtenido por calibración. Se asumió una densidad sólida de grano de sedimento típica de 2650 kg/m³. La velocidad de caída se calculó utilizando las fórmulas de Van Rijn (1989) para sedimentos de menos 100 µm:

$$w_s = \frac{1}{18} \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right) \frac{g \cdot d_{50}^2}{\nu}$$

donde ρ_s es la densidad del sedimento, ρ_w la del agua y ν la viscosidad cinemática del agua. Para un d_{50} de 7 µm (de acuerdo a lo discutido en la sección anterior) se obtuvo una velocidad de 0,043 mm/s.

Se adoptó una velocidad de corte crítica de deposición típica para limos de 8 mm/s (Harrison & Owen, 1971), muy utilizados en otros problemas con diámetros de sedimentos similares (embalse de Yacyretá, embalses de Condor Cliff/Barrancosa, Río de la Plata).

Para la densidad seca de limos depositados en embalses se recomiendan valores de entre 900 y 1200 kg/m³ (García, 2008), por lo que se adoptó un valor intermedio de 1050 kg/m³.

2.1.4 Resultados

Como se explicó anteriormente, para obtener tasas de deposición medias se simuló, para los distintos escenarios de obra, un período de 1 año a caudal constante correspondiente a condiciones medias, utilizando (por razones de estabilidad) un paso de tiempo de 5 min. El modelo se inicializó con concentraciones y espesores de sedimento depositados nulos. Durante los primeros días de la simulación se produce un transitorio muy corto, luego del cual la pluma de sedimentos adquiere condiciones de régimen. La tasa media de deposición se calculó al final de la corrida en función del espesor total de la capa el sedimento acumulado en el fondo.

En la **Figura 2.3** se presenta el perfil de concentraciones de sedimento suspendido para el embalse Itatí-Itacorá a cota 61m. En la casi todo el embalse se observan concentraciones cercanas a 5 mg/l, con una reducción muy gradual en la dirección longitudinal. El A° Yabebyry genera una pluma de turbidez sobre la margen, con concentraciones máximas más elevadas, del orden de 10 mg/l, pero esta se atenúa por dilución en forma relativamente rápida, sobre una distancia del orden de 30 km. Las concentraciones más elevadas ingresantes desde el brazo Aña Cuá se atenúan en la confluencia con el brazo Principal.

La **Figura 2.4** muestra la tasa de deposición para el embalse a cota 61m. Se observan tasas casi despreciables sobre el curso principal del río, pero que pueden llegar hasta aproximadamente 8 mm/año en extensas zonas que en condiciones naturales pertenecen a la planicie de inundación del río, sobre todo sobre la margen derecha, así como sobre la isla Apipé. En la zona de margen derecha, aguas abajo de la desembocadura del A° Yabebyry, se distinguen algunas pequeñas zonas de deposición significativa concentrada, con tasas de hasta 2 cm/año. Estas tasas de deposición están asociadas al aporte lateral del arroyo Yabebyry.

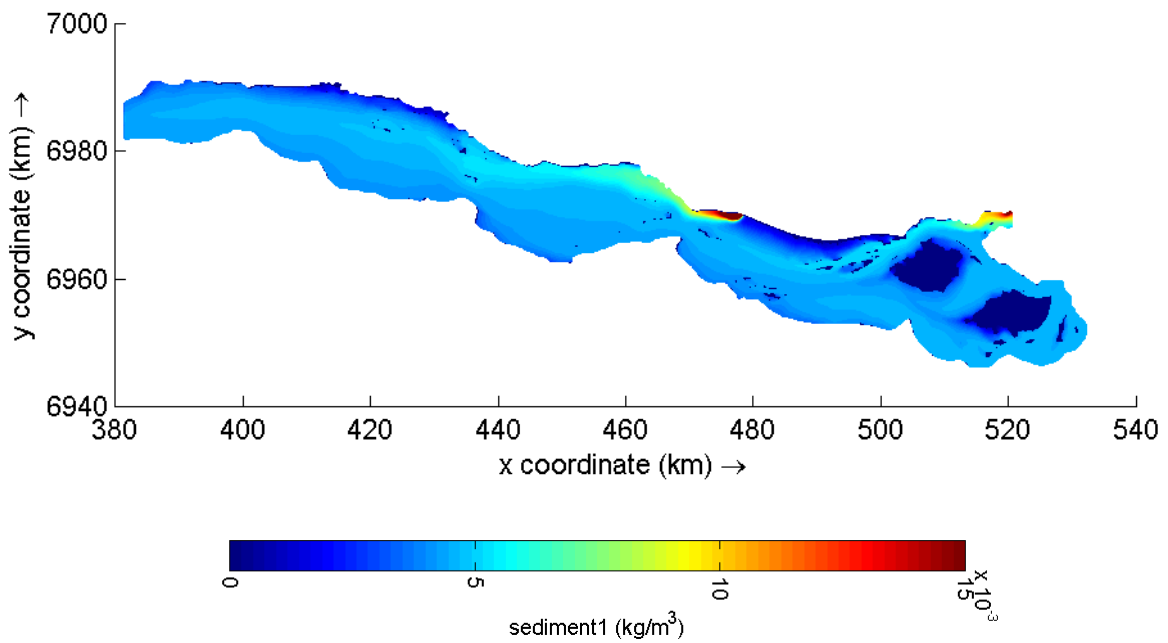


Figura 2.3. Perfil de concentraciones de sedimento suspendido para condiciones medias, nivel de embalse 61m.

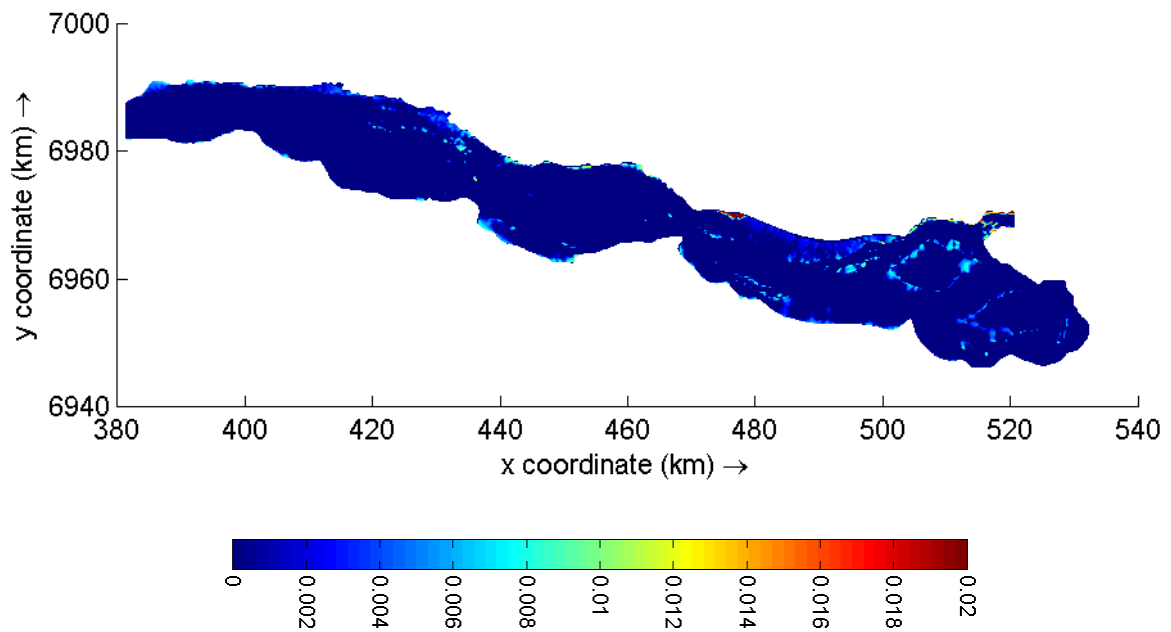


Figura 2.4. Tasa de deposición (m/año) para condiciones medias, nivel de embalse 61m.

En la **Figura 2.5** se presenta el perfil de concentraciones de sedimento suspendido para el embalse Itatí-Itacorá a cota 59m. Se observa un patrón cuali-cuantitativo similar al del caso de 61m. Hay que tener en cuenta que algunas de las zonas coloreadas en azul oscuro sobre la margen derecha no se inundan con nivel de 59m, por lo que el modelo indica concentraciones de sedimento nulas.

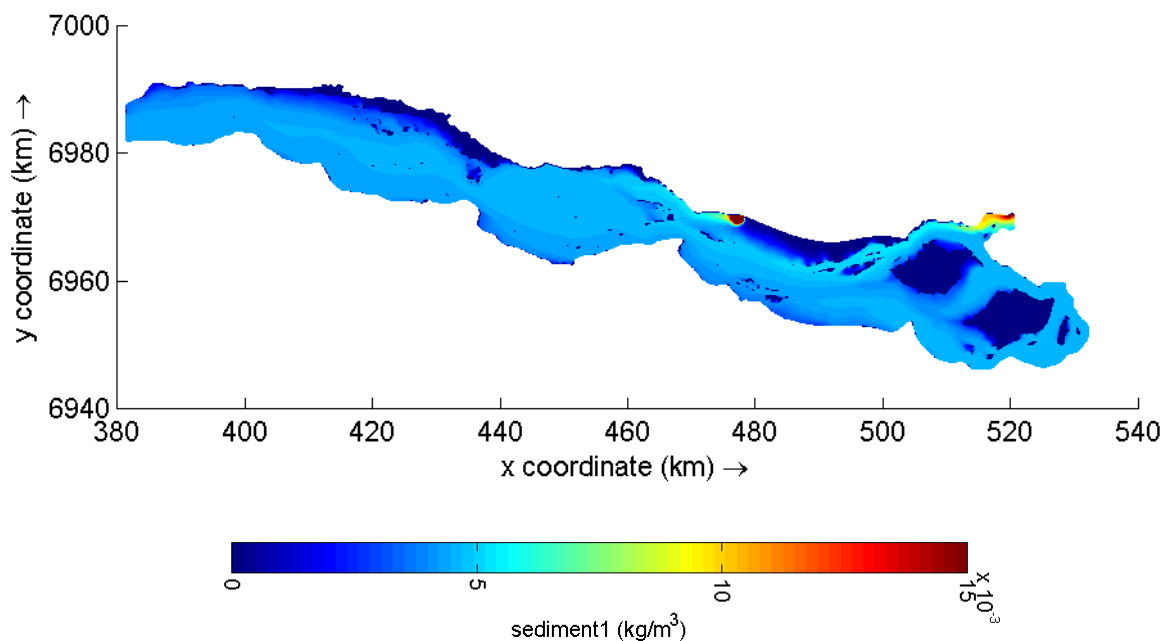


Figura 2.5. Perfil de concentraciones de sedimento suspendido para condiciones medias, nivel de embalse 59m.

En la **Figura 2.6** se presenta la tasa de deposición para el embalse a cota 59m. Si bien las tasas continúan en el mismo orden que el caso de cota 61m, se observa una reducción de las zonas con deposición más significativa sobre las planicies de inundación, lo cual era de esperarse por el incremento de la dinámica. Por la misma causa, la zona de sedimentación por el aporte del A⁰ Yabebyry se concentra aún más cerca de su desembocadura.

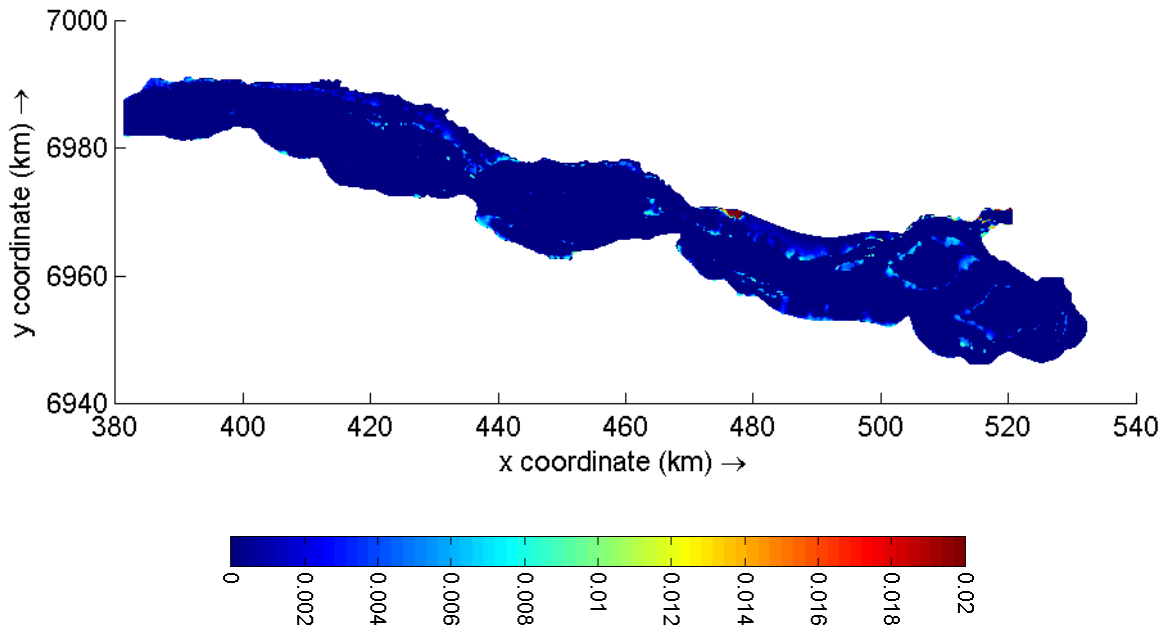


Figura 2.6. Tasa de deposición (m/año) para condiciones medias, nivel de embalse 61m.

2.1.5 Sensibilidad de los resultados

El proceso de sedimentación de sedimentos finos es lineal respecto de la carga de sedimento y la velocidad de caída. A su vez, la velocidad de caída para sedimentos finos depende de manera cuadrática del tamaño medio de grano. El espesor de sedimentos depositados es también inversamente proporcional a la densidad seca del sedimento en el fondo.

A partir de este análisis sencillo, surgen las siguientes sensibilidades de la tasa de sedimentación:

- Con los valores adoptados de los parámetros: de hasta 8 mm/año en zonas de planicie e islas
- Considerando un incremento de 20% de carga de sedimento: de hasta 10 mm/año en zonas de planicie e islas (+20%).
- Considerando un incremento del d_{50} de 7 a 10 μm (+30%): tasa de hasta 14 mm/año en zonas de planicie e islas (+70%).
- Considerando una densidad seca del sedimento depositado de 900 kg/m^3 (-14%): de hasta 9.3 mm/año en zonas de planicie e islas (+17%).

Se observa que, de entre estos parámetros, la máxima sensibilidad se da con el tamaño medio del sedimento. No obstante, en ningún caso se altera la conclusión acerca la relativamente baja tasa de sedimentación.

2.2 Erosión aguas abajo del cierre Itatí-Itacorá

2.2.1 Planteo del problema

La construcción de la presa de Itatí-Itacorá cortará el transporte de material de fondo (arenas) desde aguas arriba, pudiendo potencialmente generar erosión de fondo en la restitución de la presa. Para analizar este problema se recurrió a información antecedente, de modo de evaluar los parámetros sedimentológicos y geológicos del lecho del río Paraná, y se efectuaron cálculos con modelación numérica.

2.2.2 Análisis de antecedentes

Se dispuso de dos estudios antecedentes para evaluar los parámetros sedimentológicos y geológicos del lecho del río Paraná. En Bosio, Chase & Asociados (1975) se presenta una serie de resultados de análisis de muestras de sedimento próximas a la actual ubicación de la Alternativa 1. En particular, se evalúan capacidades resistivas de los suelos, curvas granulométricas, características de los suelos, permeabilidades y otros parámetros de interés para la construcción de una presa. Giambastini, Leiva & Delgado (2017) confirman varias de las hipótesis planteadas en el informe anterior, y agrega mayor información sobre aspectos geotécnicos y geológicos de las márgenes y planicies de inundación del río Paraná en la ubicación de ambas alternativas y en la zona del embalse.

En la campaña de investigaciones geotécnicas de 1975 se tomaron muestras en distintos puntos de la sección propuesta para la construcción de la presa de Itatí-Itacorá (**Figura 2.7**). Los más relevantes a los fines del presente análisis son los puntos R6 y R8, ubicados en el lecho del río Paraná. Los puntos P1 a P5 se encuentran sobre la costa Paraguaya, R7 en una isla del río y A9 a A11 sobre la margen argentina.

Las curvas granulométricas superficiales de los puntos R6 y R8 destacan las características mal graduadas de las arenas y areniscas, con un diámetro medio d_{50} de alrededor de 300 μm (**Figura 2.8**). A mayor profundidad se observó la presencia de arenas gruesas y gravas finas.

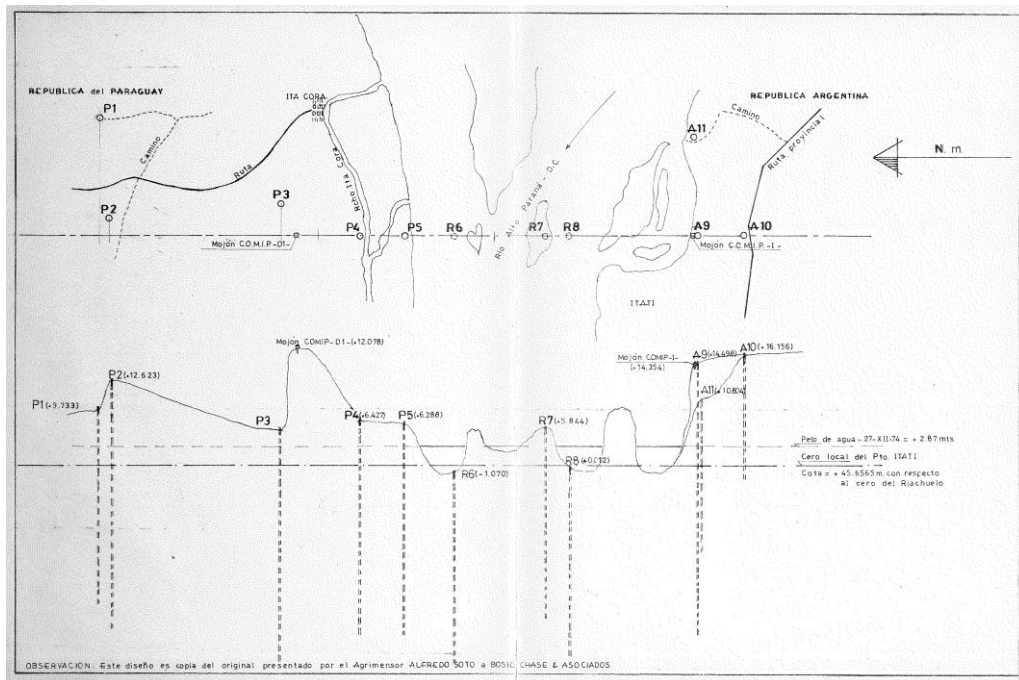
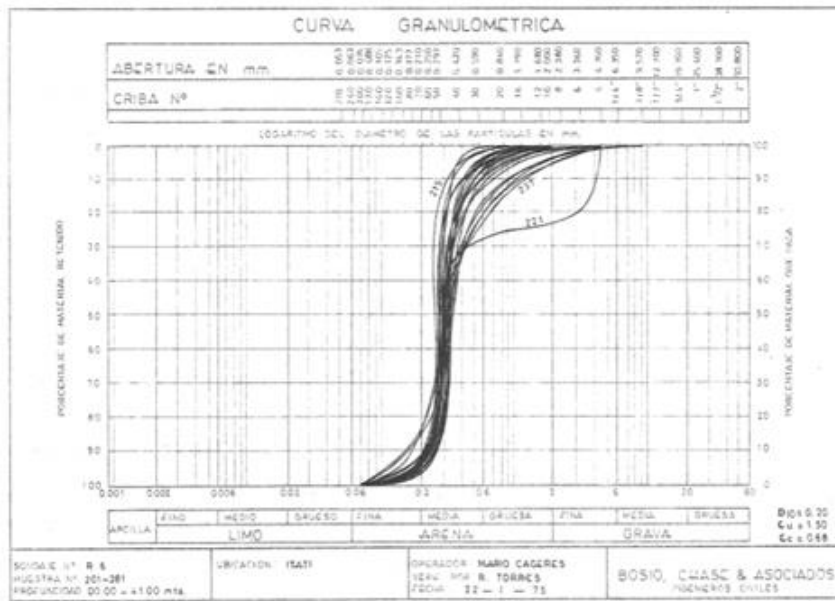
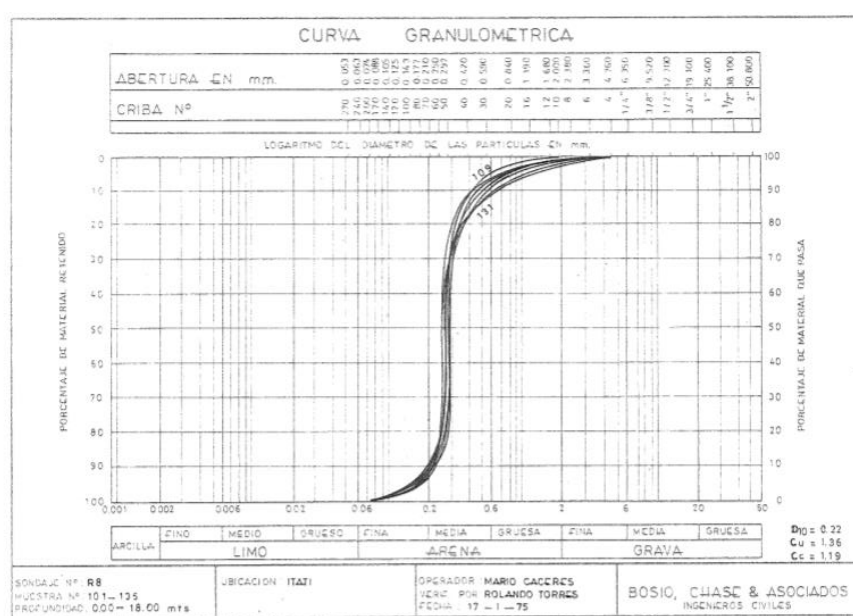


Figura 2.7. Ubicación de puntos relevados en la campaña de 1975.



a) R6



b) R8

Figura 2.8. Curvas granulométricas de muestras superficiales.

La capacidad erosiva del lecho del río no fue directamente determinada, pero los análisis indicaron la existencia de estratos con capacidad de limitar la erosión. De acuerdo con la descripción de los estratos y su grado de competencia, medidos con el índice SPT, el subsuelo del eje Itatí-Itacorá podría ser dividido en 3 niveles (**Figura 2.9**):

- a) Cobertura superficial de hasta 11m de espesor formado por sedimentos areno-limo-arcillosos, limosos y arcillo arenosos, algunos con alta plasticidad y otros con mediana plasticidad, de colores pardo, grises, marrones, negros y hasta verdosos, con SPT variable entre 1 y 35, que coronan las barras de llanura de inundación del río.
- b) Depósitos arenosos medios a gruesos, con gravas, inconsolidados, de color amarillento, SPT entre 15 y 40, posiblemente correspondiente al horizonte de alteración de las areniscas amarillentas subyacentes de la Fm. Ituzaingó, con mediana a alta compactación.
- c) Areniscas y conglomerados consolidados, de color amarillento, con SPT > 50, muy compactos, con niveles cementados con óxidos de hierro. Sería la Fm. Ituzaingó competente.

El estrato inferior, de areniscas y conglomerados consolidados, con su techo a una cota dentro del rango de 30 a 40 mIGN, podría considerarse como un adecuado límite a la erosión para esta sección del río. Resulta relevante indicar que del relevamiento batimétrico realizado recientemente por Itaipú Binacional (2017) surge que el talweg del río en esa sección se encuentra a una cota de 35,63 mIGN, consistente con el nivel del estrato consolidado, lo que resulta compatible con pensar que el fondo del río ya se encuentra limitado en su posibilidad de profundización por erosión.

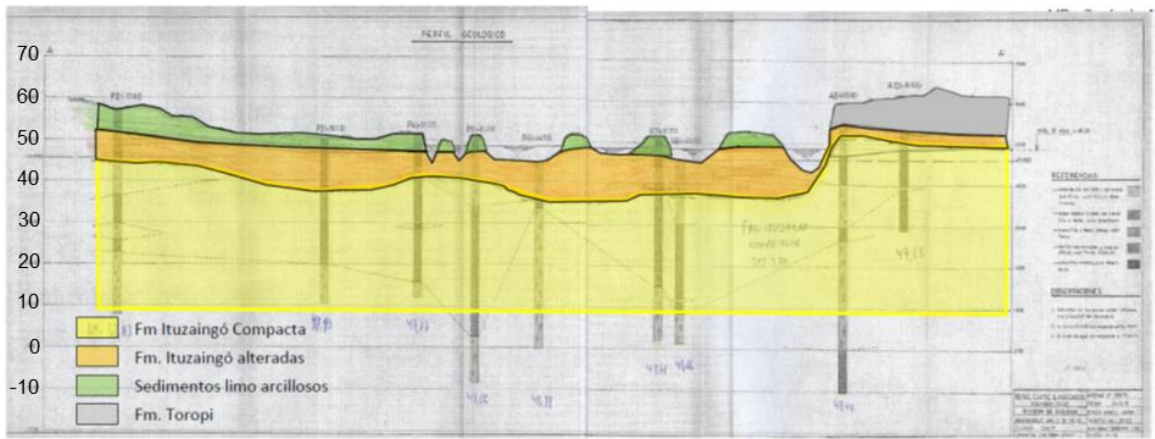


Figura 2.9. Perfil geológico interpretativo, visto desde aguas abajo, en el eje original del proyecto Itatí Itacora, entre los sondeos P2 y A10.

La **Figura 2.15** muestra la cota del fondo del talweg de acuerdo al relevamiento de Itaipú Binacional (2017). Sobre esos datos se ha planteado una franja media probable de ubicación del techo del estrato consolidado, siguiendo la pendiente media del fondo. Cerca del cierre de Alternativa 2 parece existir una profundización de ese techo.

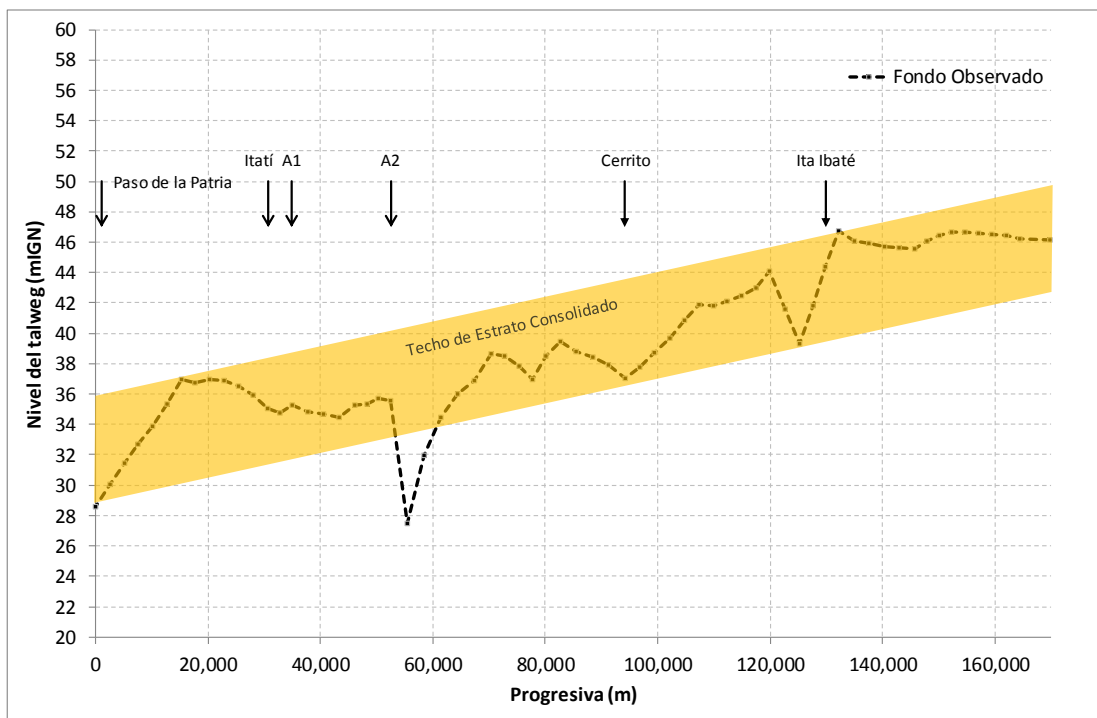


Figura 2.10. Cota del lecho del río en las secciones relevadas por Itaipú (2017).

De esta interpretación de la información disponible surge que probablemente el lecho del río Paraná en todo el tramo relevado haya alcanzado un estrato consolidado que impide su profundización bajo la acción de los esfuerzos de corte asociados a las condiciones hidrodinámicas del río.

No obstante, no puede descartarse que la situación sea de mayor riesgo, por lo cual en la próxima sección se encara un estudio de modelación para determinar cómo se profundizaría el río si el supuesto estrato consolidado se comportara como material suelto no consolidado.

2.2.3 Evolución para fondo no consolidado

Se implementó un modelo hidrodinámico unidimensional con un módulo de transporte de sedimento y morfológico acoplados usando el código HEC-RAS.

El dominio del modelo se extiende desde los cierres propuestos (Alternativa 1 y Alternativa 2) hasta la ciudad de Paso de Patria. La geometría del modelo se construyó utilizando las secciones transversales relevadas recientemente (Itaipú Binacional, 2017). Para el caso de la Alternativa 1 se utilizaron un total de 4 secciones relevadas, mientras que para la Alternativa 2 se incluyeron 6 secciones. Para lograr una representación más continua de los procesos morfológicos, se interpolaron secciones transversales intermedias con un espaciamiento de 3 km, por lo que en total se trabajó con 15 secciones para la Alternativa 1 (Figura 2.11) y 22 para la Alternativa 2 (Figura 2.12).

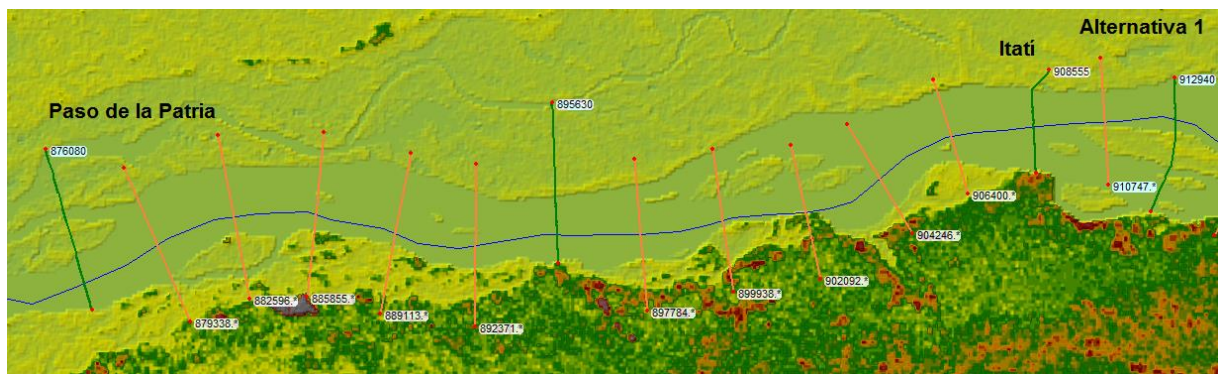


Figura 2.11. Secciones del modelo de la Alternativa 1.

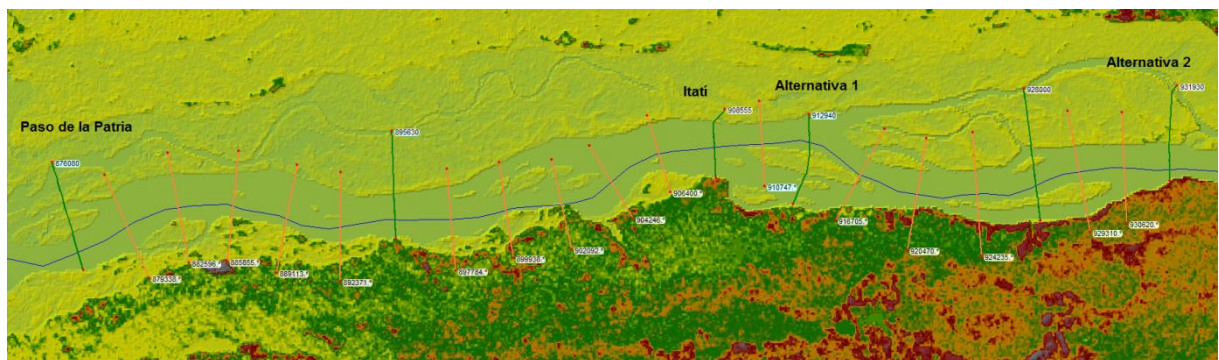


Figura 2.12. Secciones del modelo de la Alternativa 2.

Adicionalmente, se construyó un tercer modelo que va desde Ita Ibaté hasta Paso de la Patria con el fin de verificar la estabilidad morfológica del perfil obtenido en los relevamientos (**Figura 2.13**).

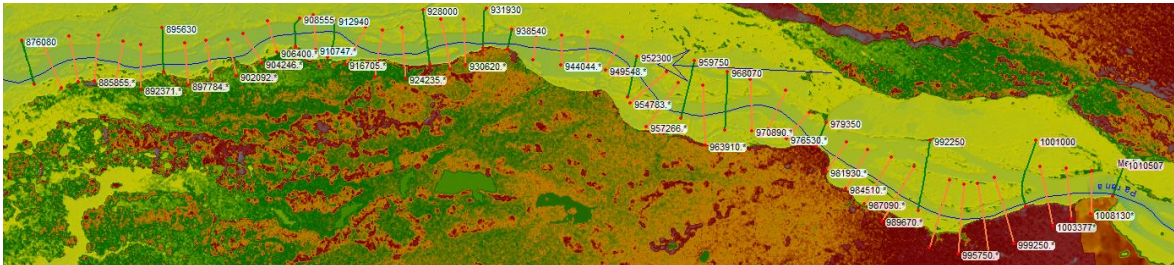


Figura 2.13. Secciones del modelo ampliado hasta Ita Ibate

Se efectuaron simulaciones a caudal constante, imponiendo como condición en el borde de aguas arriba un caudal total de $14.735 \text{ m}^3/\text{s}$ (representativo de condiciones medias) y un nivel de 47,8m en el borde de aguas abajo. Este último valor es compatible con observaciones en Paso de la Patria para condiciones medias, y garantiza la existencia de condiciones de flujo libre (ausencia de efectos de remanso).

Para caracterizar el sedimento de fondo se utilizó curva granulométrica discreta mostrada en la **Figura 2.19**, representativa de las curvas granulométricas medias para los puntos R6 y R8.

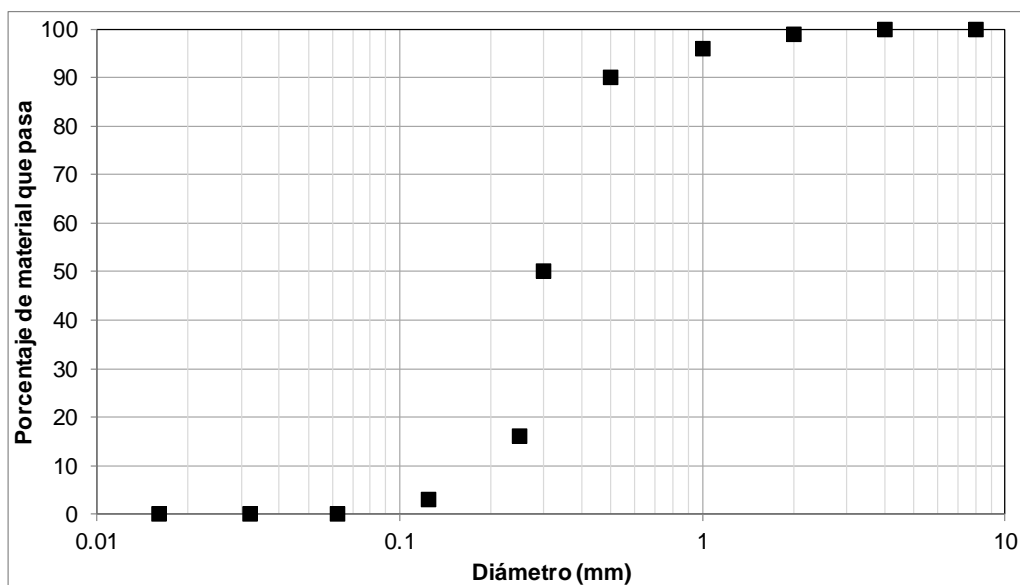


Figura 2.14. Curva granulométrica utilizada en la modelación.

Se seleccionó la fórmula de transporte total de sedimento (combinado de fondo y en suspensión) de Engelund-Hansen, reconocida como la más apta para el río Paraná Medio (Alarcón et al., 2003; Amsler y Prendes, 2000):

$$g_s = 0.05\gamma_s V^2 \sqrt{\frac{d_{50}}{g \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)}} \left[\frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} \right]^{3/2}$$

donde g_s es el transporte de sedimento, γ la densidad del agua, γ_s la densidad del sedimento, g la aceleración de la gravedad, V la velocidad media del flujo, d_{50} el diámetro medio y τ_0 la tensión de fondo.

Se realizó un análisis de sensibilidad de los resultados utilizando otras fórmulas propuestas por el software (Ackers-White, Engelund-Hansen, Laursen (Copenad), Meyer Peter Muller, Toffaleti, Yang, Wilcock), verificándose variaciones mínimas en los valores de erosión calculados.

Se simuló, para cada escenario, un período de 100 años de duración, correspondiente a la vida útil del proyecto, con un paso temporal morfológico de 1 día.

En primer lugar se analizó el caso sin presa con el fin de verificar la estabilidad morfológica del perfil obtenido en los relevamientos. Se supuso condiciones de equilibrio en el borde de aguas arriba, manteniéndose entonces fija la cota de fondo. Se observó que se produce una evolución del nivel de fondo (**Figura 2.15**), alcanzándose condiciones de equilibrio luego de alrededor de 20 años de simulación. Sin embargo, los cambios de nivel de fondo resultantes son relativamente pequeños, lo que es una indicación de que la situación actual sería de cuasi equilibrio en todas las secciones aún si el estrato no fuera consolidado.

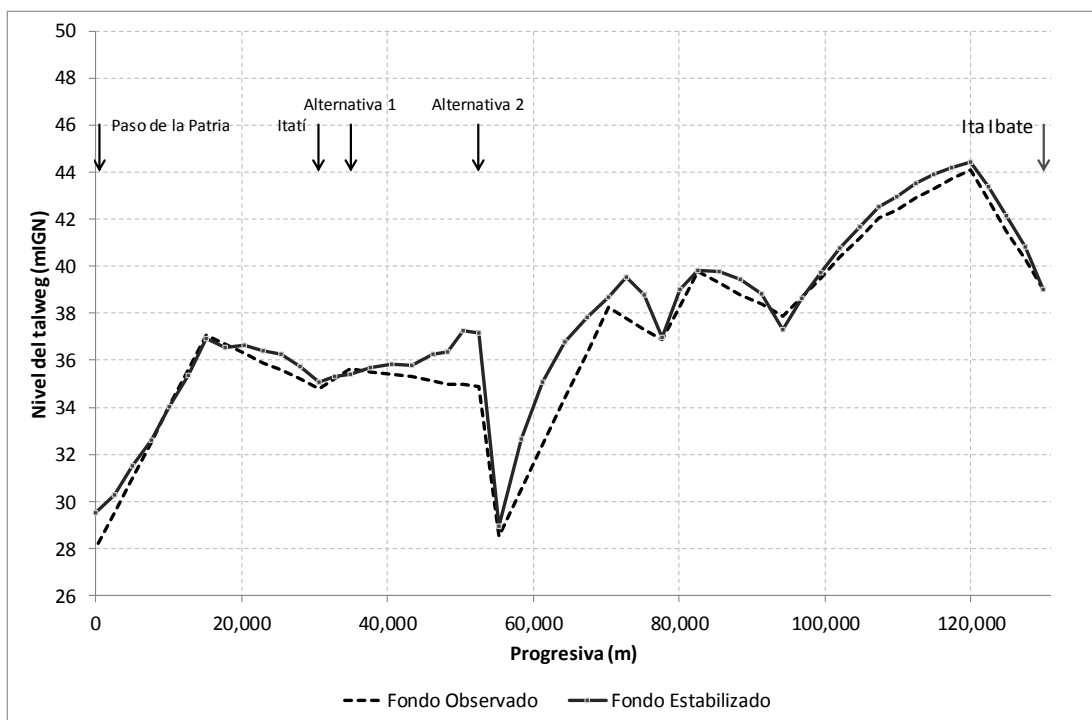


Figura 2.15. Progresión morfológica del talweg del río para condiciones naturales.

Luego se realizaron las simulaciones incluyendo la presa de Itatí-Itacorá, lo cual se logra imponiendo concentración de sedimento nulo en esa sección (que equivale a considerar caudal sólido nulo). Para la Alternativa 1 (**Figura 2.16**) se observa un descenso del lecho de aproximadamente 10 metros a los 100 años, mientras que para la Alternativa 2 (**Figura 2.17**) el descenso es de 13 metros. En ambos casos se observa que este descenso se manifiesta como una onda de erosión que se desplaza hacia aguas abajo. En ambas figuras también se ha representado la franja media probable del techo del estrato consolidado, que sería el limitador natural de la erosión.

En la **Figura 2.18** y **Figura 2.19** se presenta la evolución de la erosión en la primera sección aguas abajo de la presa durante los 100 años de simulación para ambas alternativas. Como era de esperarse, la tasa de erosión es más significativa durante la primera década, disminuyendo con el tiempo hasta alcanzar una tasa del orden de 5 cm/año. Una tal erosión al pie atentaría contra la estabilidad de la presa, de modo que resulta vital efectuar estudios de suelo que corroboren que existe un estrato consolidado capaz de resistir a la erosión.

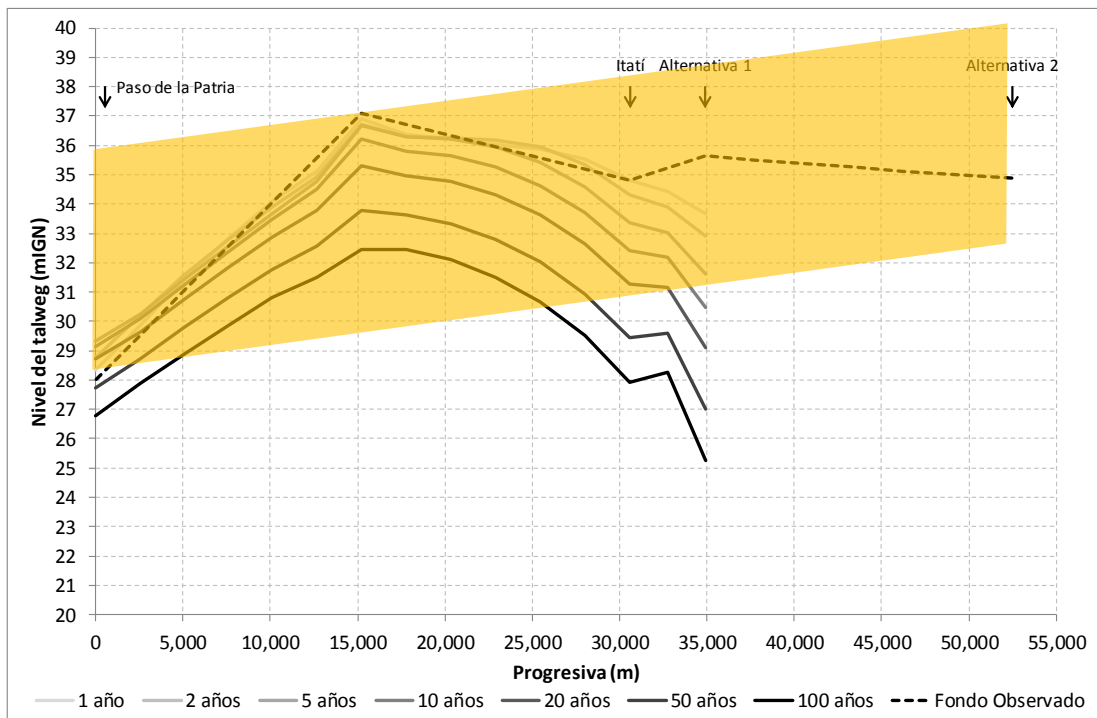


Figura 2.16. Progresión morfológica del talweg del río para la Alternativa 1.

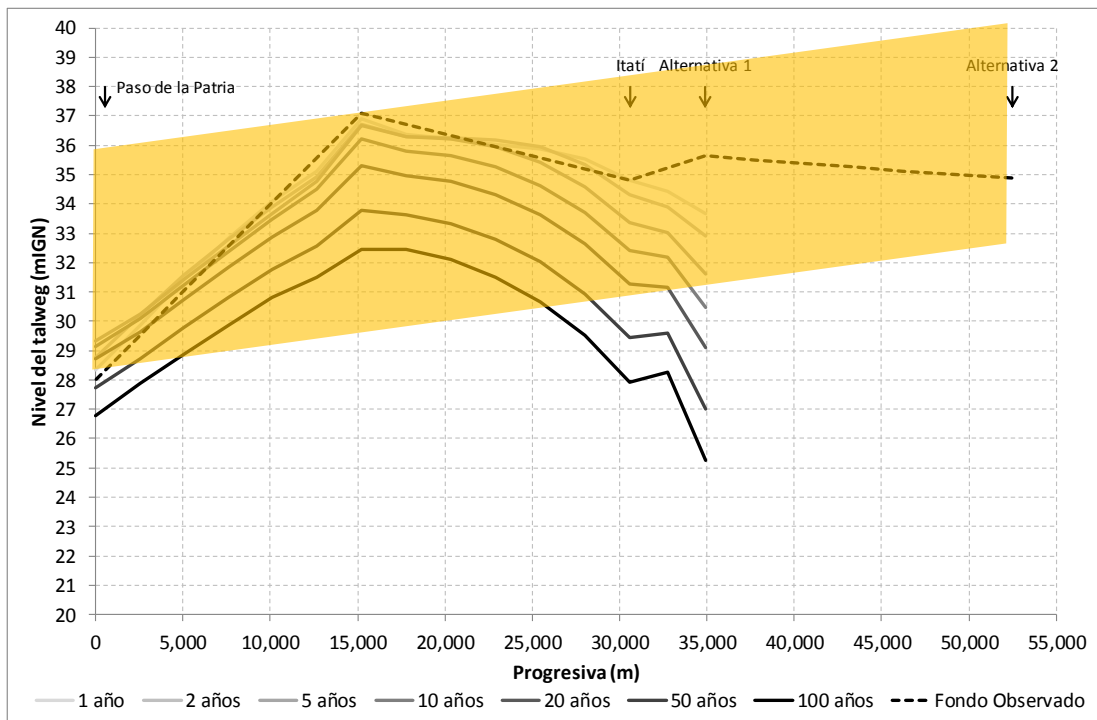


Figura 2.17. Progresión morfológica del talweg del río para la Alternativa 2.

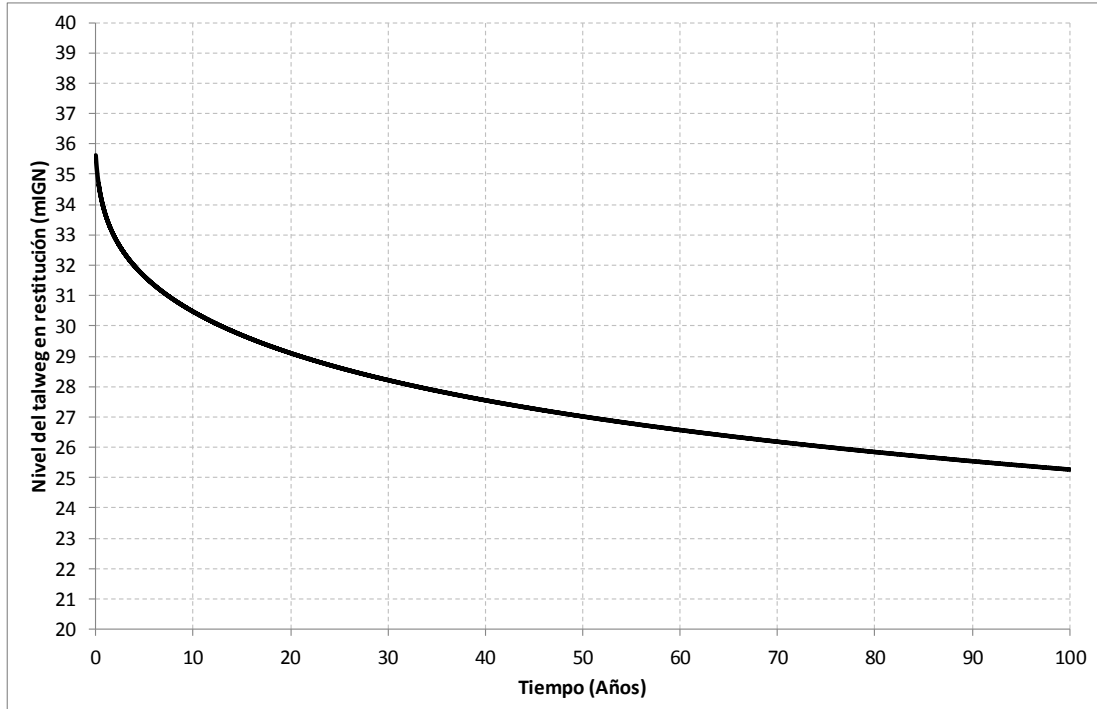


Figura 2.18. Evolución temporal del nivel del talweg en la restitución para la Alternativa 1.

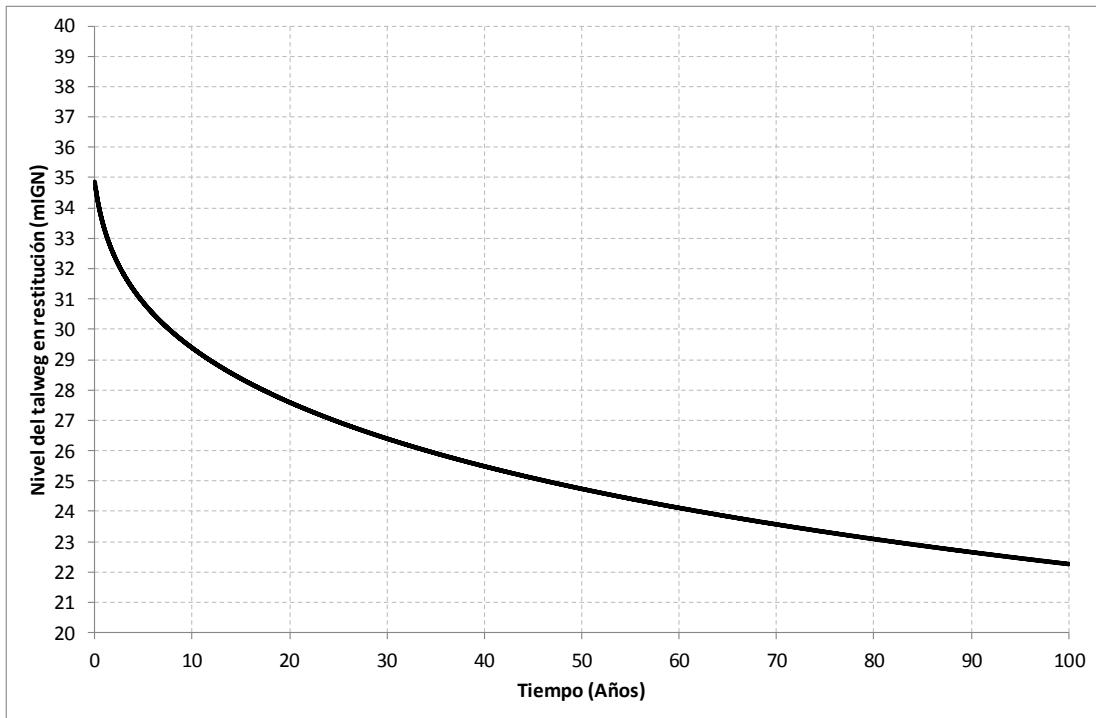


Figura 2.19. Evolución temporal del nivel del talweg en la restitución para la Alternativa 2.

3 APOORTE HIDROLÓGICO

3.1 Consideraciones generales

En el Primer Informe Parcial se presentaron resultados preliminares para el aporte hidrológico desde la margen izquierda (Argentina) hacia el futuro embalse de Itatí-Itacorá. En el Segundo Informe Parcial se analizaron los aportes desde la margen derecha (Paraguay).

En este Tercer Informe Parcial se presentan los resultados definitivos para la margen izquierda, luego de efectuarse una discretización más detallada de las subcuencas y compatibilizar los criterios de selección de eventos con los que fueron utilizados para la margen derecha, de más larga duración.

3.2 Redefinición de subcuencas

La **Figura 3.1** muestra la zona de estudio correspondiente al tramo del río Paraná que va desde el embalse de Yacyretá hasta el cierre Itatí-Itacorá, y la división adoptada en 12 subcuencas, a diferencia de lo efectuado en el Primer Informe Parcial, donde se habían considerado solo 4 grandes subcuencas. La **Figura 3.2** muestra en detalle las subcuencas identificadas.

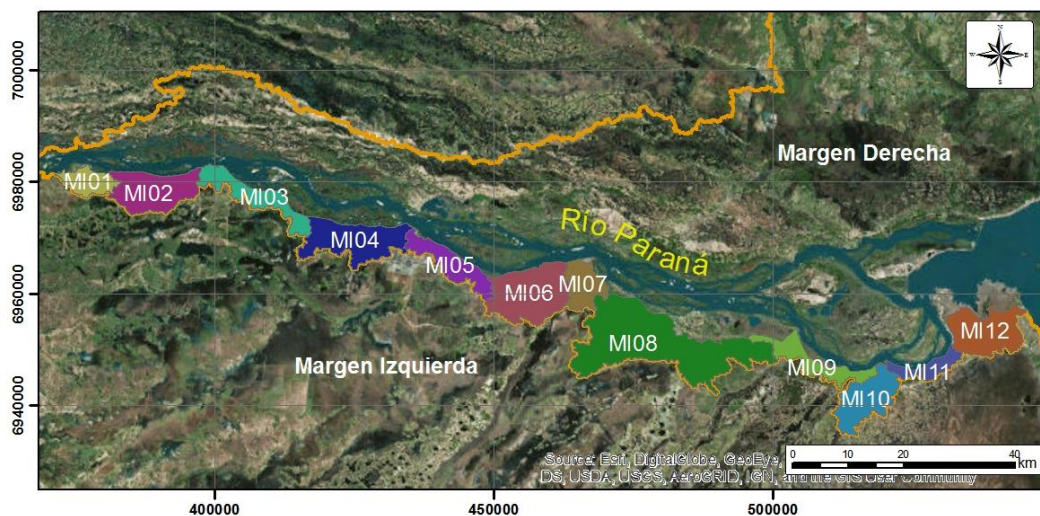
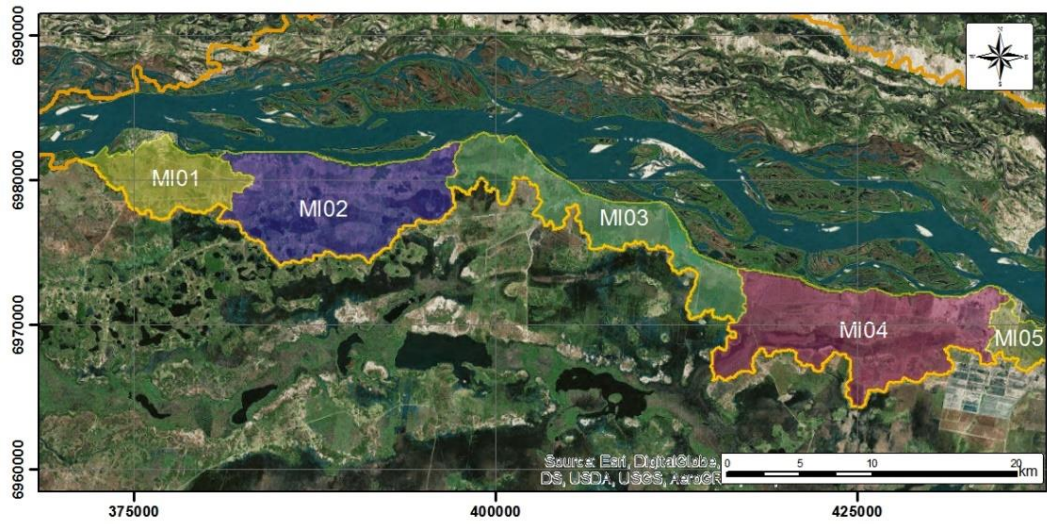
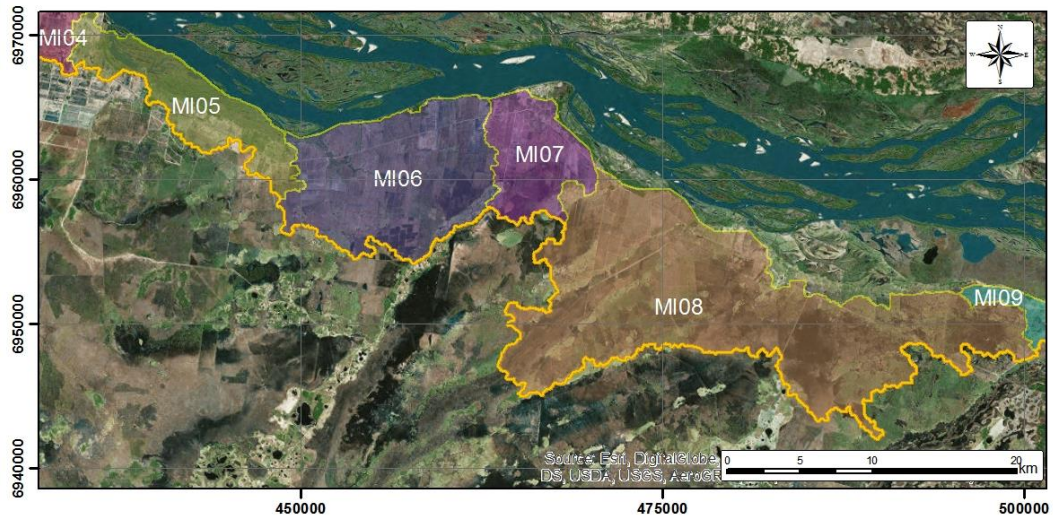


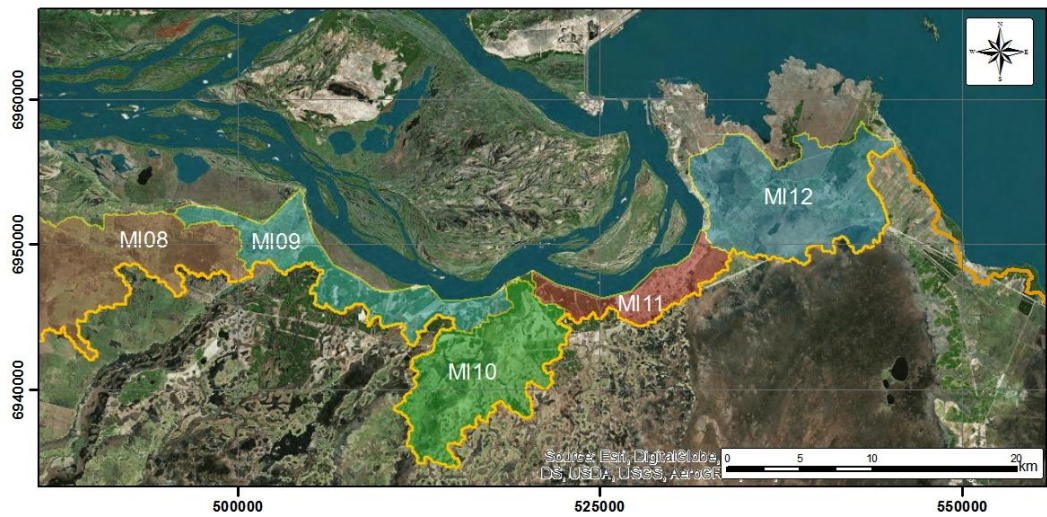
Figura 3.1. Subcuencas de la margen izquierda



a) Subcuencas MI01 a MI04



b) Subcuencas MI05 a MI08



c) Subcuencas MI09 a MI12

Figura 3.2. Detalle de subcuencas de la margen izquierda.

3.3 Modelación hidrológica

La estrategia de modelación hidrológica es la que se ha descrito en el Primer Informe Parcial. A continuación se indican los cambios que se han efectuado respecto de la modelación preliminar.

3.3.1 Características de las subcuencas

Para las 12 subcuencas se determinaron el área, la longitud de los cauces más extensos y la pendiente media de dichos cauces. Esta información se visualiza en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1. Características topográficas de las subcuencas.

Subcuenca	Area (km ²)	Long (km)	Pend (%)
MI 1	36	10	0.050
MI 2	93	16	0.038
MI 3	65	5	0.100
MI 4	103	20	0.040
MI 5	59	10	0.080
MI 6	121	19	0.053
MI 7	48	9	0.056
MI 8	276	42	0.021
MI 9	56	5	0.160
MI 10	75	14	0.057
MI 11	30	3	0.233
MI 12	91	12	0.100

3.3.2 Tormenta de diseño

Para compatibilizar con lo realizado para la margen derecha (Paraguay), se adoptaron las tormentas sintéticas del Segundo Informe Parcial. Específicamente, para los eventos de 5, 10 y 50 años de recurrencia se utilizaron las tormentas sintéticas de 24 horas de duración asociadas a la Estación Encarnación, situada en Paraguay.

3.3.3 Método de pérdidas

Para el cálculo de las pérdidas se utilizó el método del SCS. A continuación se describe como se obtuvieron los valores de los parámetros asociados.

Para la clasificación de los suelos se utilizó el Inventario de Suelos de la República

Argentina, descargado del Sistema de Gestión de Datos Espaciales del INTA¹. Este proporciona una clasificación de los suelos y una evaluación de las tierras del país. La escala gráfica es 1:500.000 para la Provincia de Corrientes. La clasificación taxonómica de suelos que se publica es de acuerdo al *Soil Taxonomy* (SCS, 1975).

En el área de interés se reconocen principalmente suelos de los órdenes de los Alfisoles, Molisoles e Inceptisoles, cuya textura superficial predominante es franco-arenosa, siguiendo en importancia la textura franca y areno-franca (**Figura 3.3**). La textura subsuperficial predominante es franco-arcillo-arenosa, franco-arenosa y areno-franca. En general, para esta zona, la permeabilidad de los suelos es lenta, caracterizada por un drenaje deficiente y una alta susceptibilidad de anegamiento. A partir de estas características, se ha considerado el grupo hidrológico de suelo del tipo B.

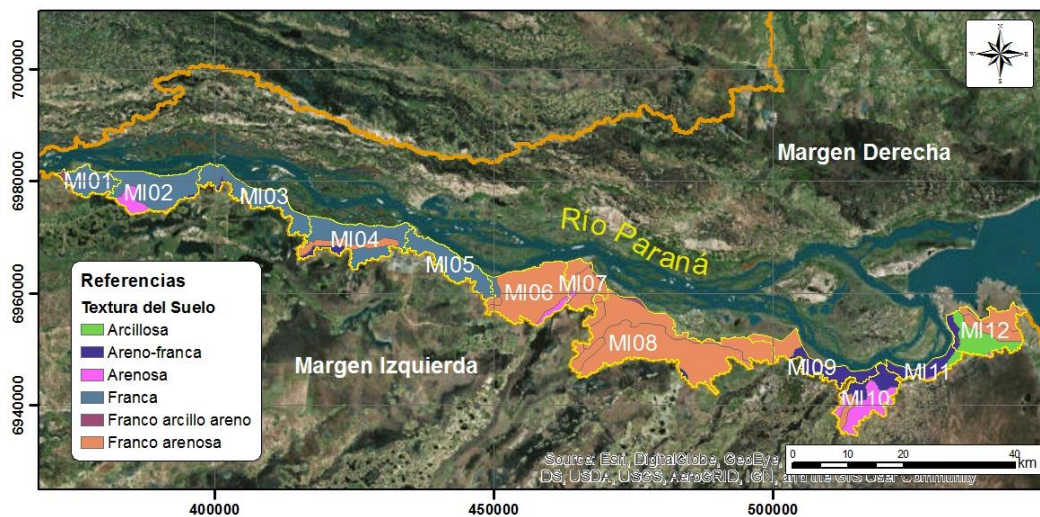


Figura 3.3. Textura del suelo superficial

Para el uso de los suelos se utilizó la Cobertura del Suelo de la República Argentina, también descargado del Sistema de Gestión de Datos Espaciales del INTA. Esta información contempla la ocupación de las tierras y uso actual de los suelos a escala exploratoria (1:500.000) mediante el sistema de clasificación de ocupación de tierras “Land Cover Classification System - LCCS”.

En la **Figura 3.4** se muestra el uso de suelo para las 12 subcuencas, que incluyen, entre otros, cultivos de herbáceas y especies arbóreas, cuerpos de agua, bosques y pastizales. Para determinar el Número de Curva (CN) se utilizó la clasificación del NRCS (2004), que permite obtener el valor de CN a partir de la cobertura vegetal, condición hidrológica y tipo de suelo. En la **Tabla 3.2** se muestran los valores de CN que se han adoptado para los distintos usos de suelos. Al analizar en detalle las imágenes satelitales, a la zona de “bosques cerrados” se le hizo corresponder la clasificación de “herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas / anegadas”.

¹ <http://geointa.inta.gov.ar>

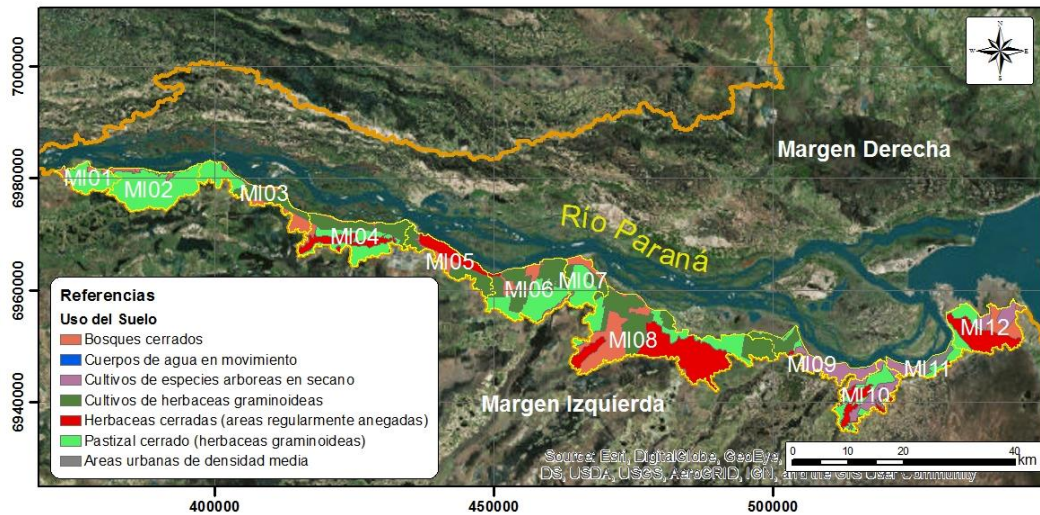


Figura 3.4. Uso del suelo

Tabla 3.2. Valores de CN adoptados para distintos usos de suelo.

Uso de suelo	CN
Áreas urbanas de densidad media	75
Cuerpos de agua	100
Cultivos de especies arbóreas en secano	65
Cultivos de herbáceas graminoideas	75
Herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas/anegadas	79
Pastizal cerrado (herbáceas graminoideas)	69

3.3.4 Método de transformación precipitación-escorrentía

El tiempo de concentración de las subcuencas se calculó con la ecuación del DNOS, a imagen y semejanza de lo efectuado en el Segundo Informe Parcial para la margen derecha. Esta fórmula es citada en el Manual de Hidrología Básica para Estructuras de Drenaje (DNIT, 2005). El tiempo de concentración para esta ecuación se encuentra en función de la pendiente media, la longitud del cauce, el área de la cuenca y un coeficiente k que depende de las características de la cuenca. Se ha adoptado el valor de $k = 3$ (terreno común, cubierto de vegetación, absorción apreciable). Los tiempos de concentración a partir de esta metodología se presentan en la **Tabla 3.3**.

Tabla 3.3. Tiempo de concentración de las subcuencas.

Subcuenca	Tiempo de concentración (hr)
MI 1	13.6
MI 2	22.2
MI 3	10.7
MI 4	23.3
MI 5	13.0
MI 6	21.7
MI 7	13.9
MI 8	46.7
MI 9	8.5
MI 10	17.1
MI 11	5.5
MI 12	14.1

3.4 Resultados

El esquema de modelación implementado se muestra en la **Figura 3.5**. Los datos utilizados en la modelación para área, tiempo de retardo y Curva Número (CN) se presentan en la **Tabla 3.4**.

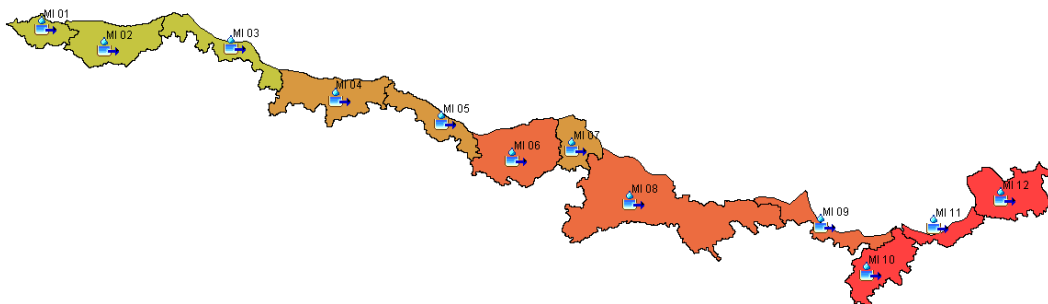


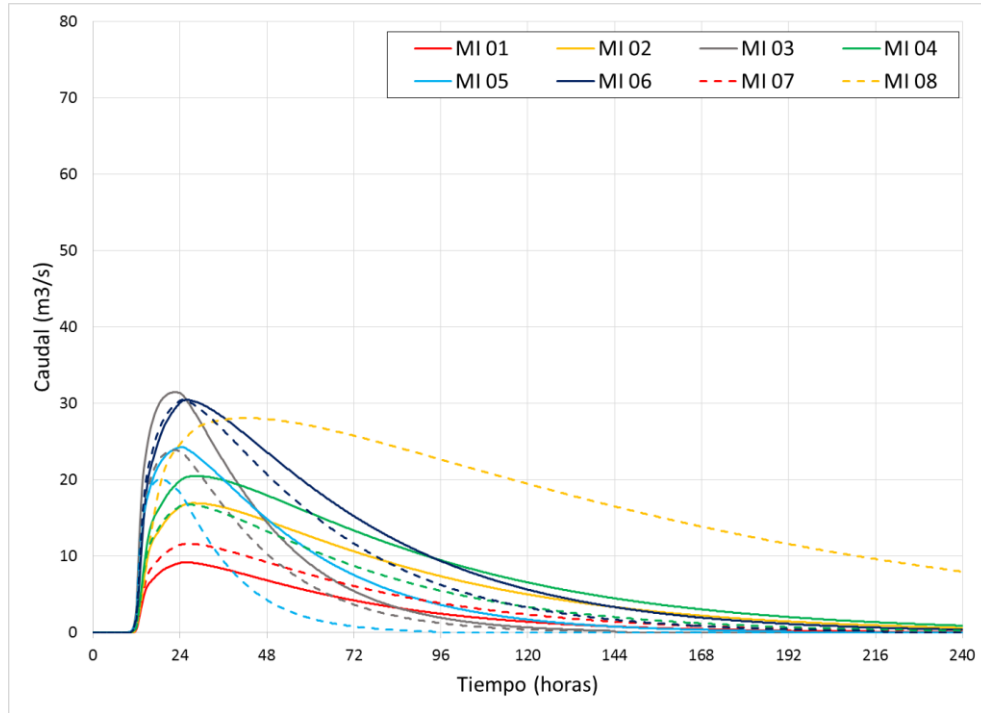
Figura 3.5. Esquema de modelación

Tabla 3.4. Datos utilizados para la modelación.

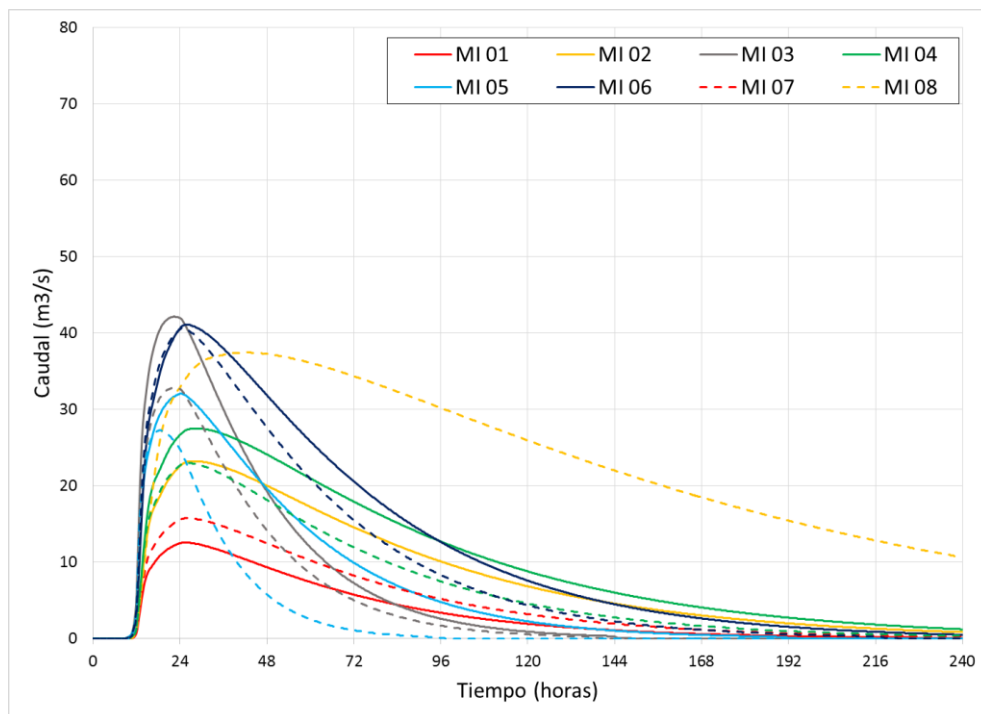
Subcuenca	Area (km ²)	Tlag (min)	CN
MI 1	36	490	70
MI 2	93	798	70
MI 3	65	384	74
MI 4	103	841	74
MI 5	59	469	77
MI 6	121	781	73
MI 7	48	499	72
MI 8	276	1681	76
MI 9	56	304	69
MI 10	75	616	70
MI 11	30	196	71

MI 12	91	507	75
-------	----	-----	----

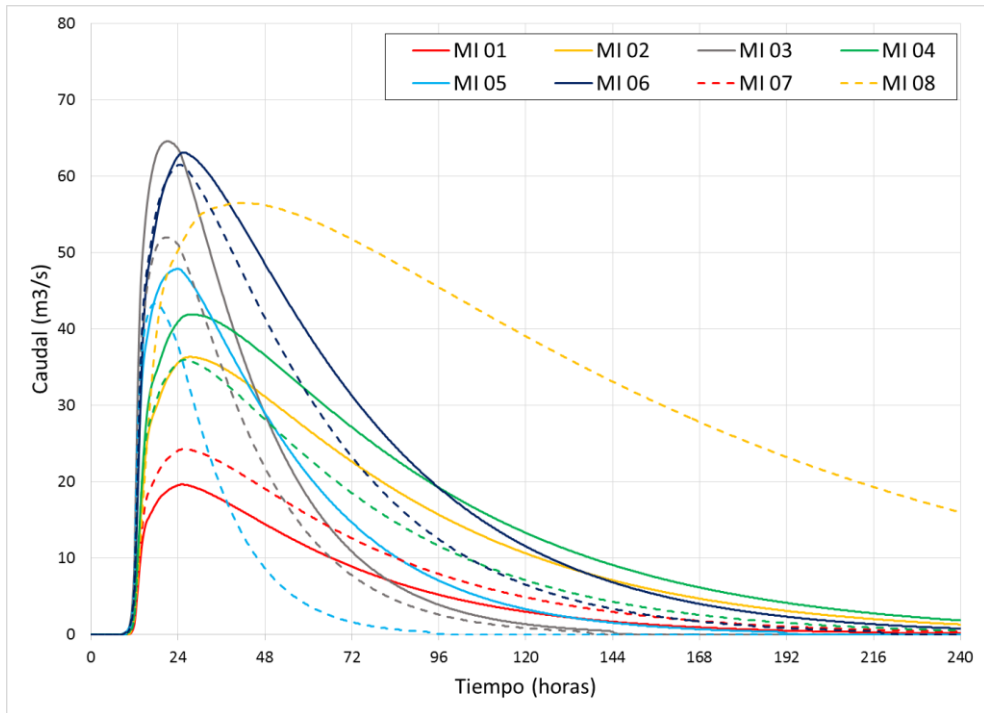
En la **Figura 3.6** se muestran los hidrogramas de cada subcuenca para los períodos de retorno de 5, 10 y 50 años. Se observa que los caudales pico máximos son de aproximadamente 30 m³/s, 40 m³/s y 65 m³/s, respectivamente. La **Figura 3.7** muestra los hidrogramas totales equivalentes para cada recurrencia.



a) $Tr = 5$ años



b) $Tr = 10$ años



c) $Tr = 50$ años

Figura 3.6. Hidrogramas por sucesión

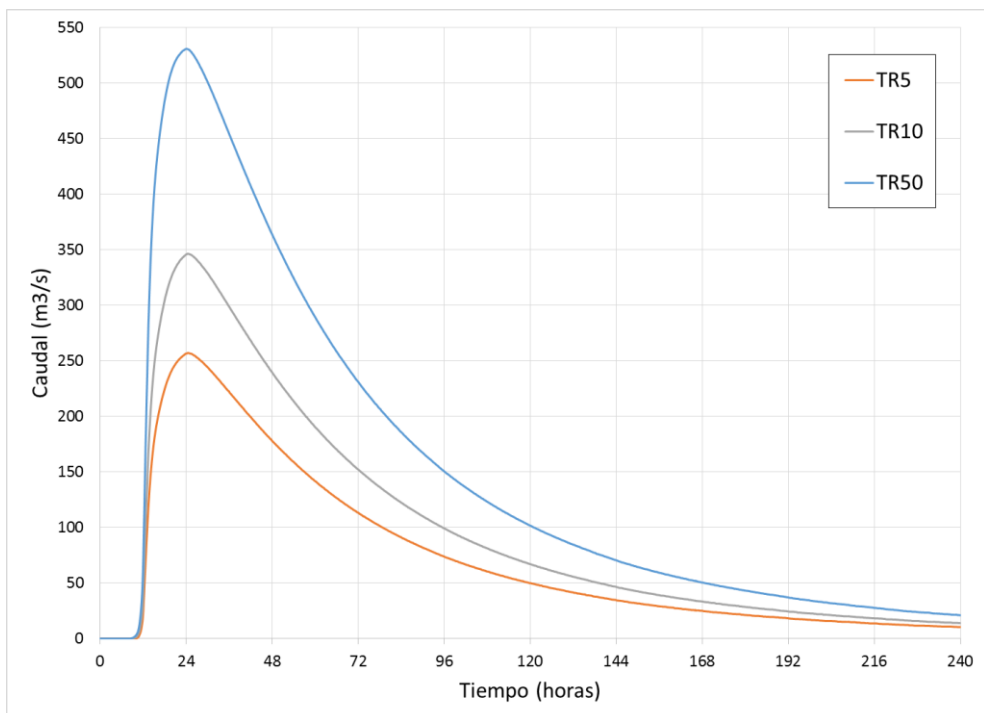


Figura 3.7. Hidrogramas totales equivalentes

3.5 Falla del puente sobre la Ruta 12

El jueves 18 de mayo de 2017 se desmoronó el puente sobre el arroyo Iribú Cuá perteneciente a la Ruta Nacional 12, que vincula la Provincia de Misiones con la de Corrientes. En la **Figura 3.8** se muestra la ubicación del puente, sobre la cabecera de la subcuenca MI03.

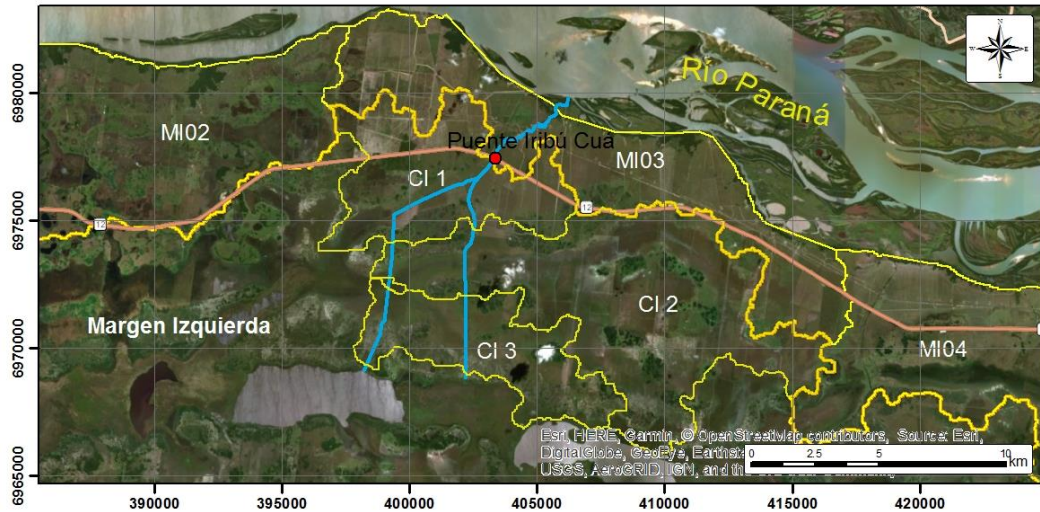


Figura 3.8. Ubicación del puente del Iribú Cuá y subcuencas de drenaje.

La **Figura 3.9** presenta una fotografía del puente una vez fallado. Se observa que al menos falló una pila, seguramente por erosión localizada. También es evidente la erosión sobre el estribo de margen derecha, que produjo el corte de la ruta, y que sugiere que en algún momento podría haberse producido un sobrepaso.



Figura 3.9. Falla del puente sobre el A° Iribú Cuá. Vista desde aguas arriba.

Se procedió a efectuar un análisis hidrológico para tratar de determinar el forzante que condujo a esta situación de falla.

A partir de las imágenes satelitales se identificaron dos grandes canalizaciones, de aproximadamente 10 km de longitud cada una, que colectan escorrentía y la transportan hasta aguas arriba del puente, tal como se indica en la **Figura 3.8**. En consecuencia, se determinaron las subcuencas de drenaje que aportan al puente, denominadas CI 1, CI 2 y CI3, y se las modeló hidrológicamente para estimar los hidrogramas resultantes para diferentes recurrencias en la sección del puente. Se utilizó la misma metodología descrita en la sección 3.3.

La **Tabla 3.5** presenta el área, la longitud de los cauces más extensos, la pendiente media de dichos cauces y el tiempo de concentración para las subcuencas del puente Iribú Cuá. La **Figura 3.10** muestra el uso de suelo para estas subcuencas, que corresponde a cultivos, pastizales y, en mayor proporción, a herbáceas en áreas regularmente anegadas.

Tabla 3.5. Características topográficas de las subcuencas del Iribú Cuá.

Subcuenca	Area (km ²)	Long (km)	Pend (%)	Tc (hr)
CI 1	37	7	0.029	15.9
CI 2	77	18	0.011	34.9
CI 3	29	8	0.025	16.0

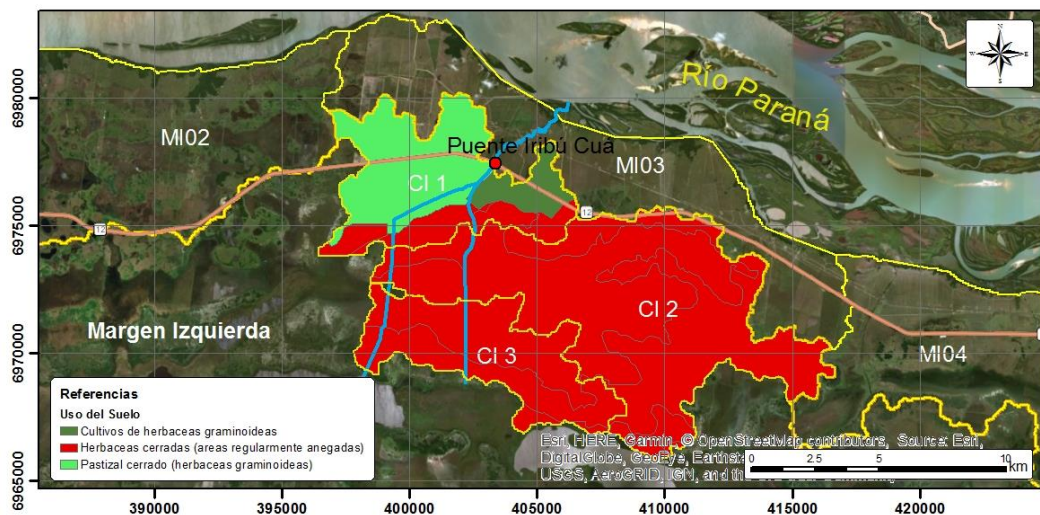


Figura 3.10. Uso del suelo de las subcuencas de drenaje del puente Iribú Cuá.

El esquema de modelación implementado se muestra en la **Figura 3.11**. Los datos utilizados en la modelación, a saber, área de la subcuenca, tiempo de retardo (Tlag) y Curva Número (CN), se presentan en la **Tabla 3.6**.

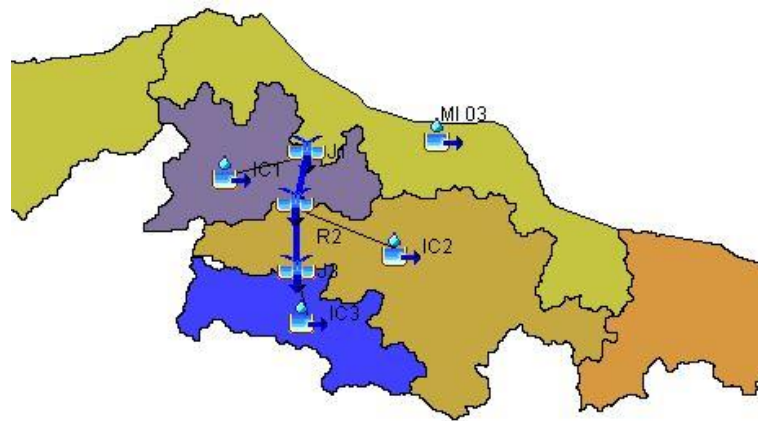


Figura 3.11. Esquema de modelación de las subcuencas de drenaje del Iribú Cuá.

Tabla 3.6. Datos utilizados para la modelación de las subcuencas del Iribú Cuá.

Subcuenca	Area (km ²)	Tlag (min)	CN
CI 1	37	573	72
CI 2	77	1258	79
CI 3	29	577	79

En la **Figura 3.12** se muestran los hidrogramas resultantes en la sección del puente para los períodos de retorno de 5, 10 y 50 años. Se observa que los caudales pico máximos son de aproximadamente 32 m³/s, 43 m³/s y 64 m³/s, respectivamente.

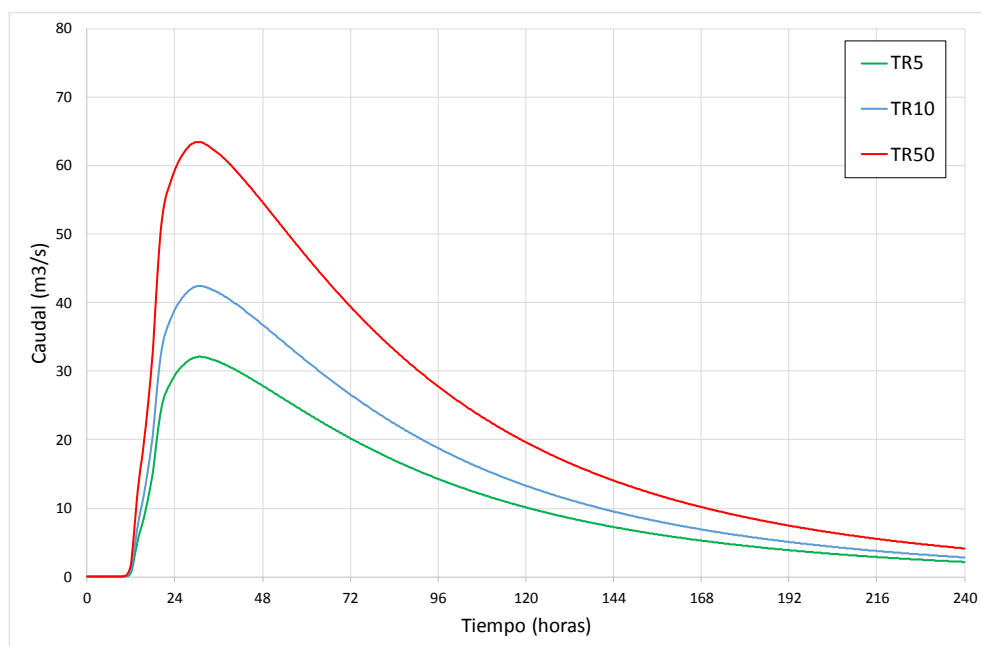


Figura 3.12. Hidrogramas resultantes en la sección del puente.

Se analizaron las precipitaciones caídas en la zona para poder inducir cuáles fueron las causas que provocaron la falla del puente. En la **Figura 3.13** se muestra la precipitación media mensual en la estación Corrientes del Servicio Meteorológico Nacional sobre un período de 30 años, junto con la correspondiente al año 2017. Nótese que en este año se produjeron lluvias muy superiores a la media, resultando un caso extremo el mes de abril, para el cual la precipitación mensual fue prácticamente el triple del valor medio para ese mes.

La **Figura 3.14** presenta la precipitación diaria en la estación Corrientes. Se observan 4 eventos de gran magnitud entre abril y mayo. En la **Tabla 3.7** se indican estos valores, tomando una precipitación acumulada de 2 días. La máxima precipitación se registró el 24/25 de abril, alcanzando 210,8 mm.

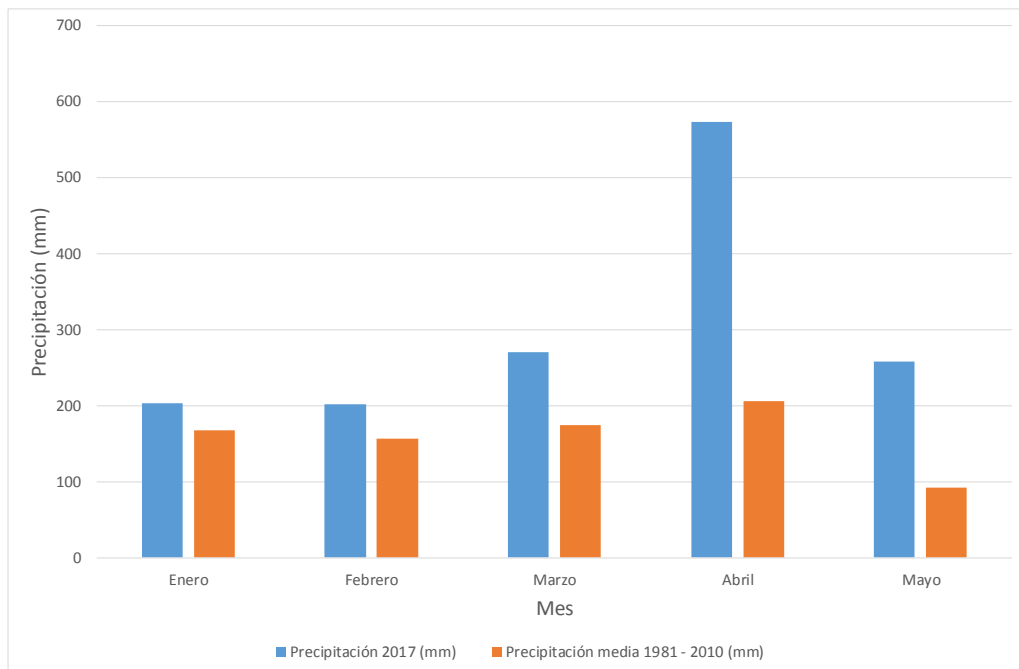


Figura 3.13. Precipitación media mensual en Corrientes

Tabla 3.7. Precipitación acumulada para periodo de dos días.

Periodo	Precipitación acumulada (mm)
08/04 - 09/04	139
18/04 - 19/04	106.5
24/04 - 25/04	210.8
12/05 - 13/05	110.7

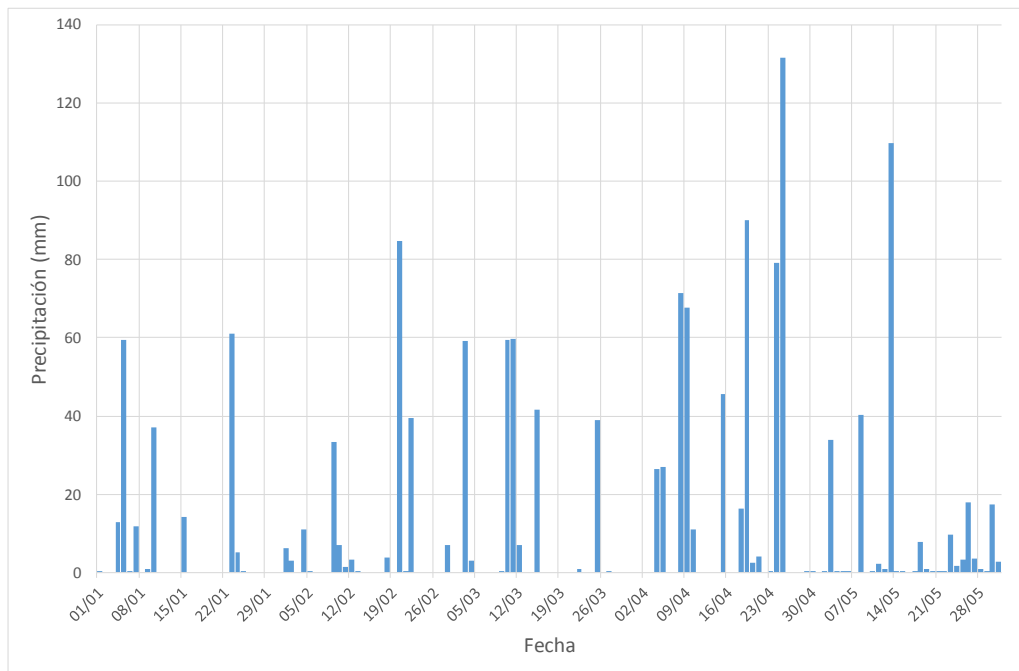


Figura 3.14. Precipitación diaria en Corrientes

Las precipitaciones asociadas a los eventos hidrológicos modelados fueron de 145 mm, 169 mm y 222 mm para las recurrencias de 5, 10 y 50 años, respectivamente. Comparando estos valores con los asociados a las precipitaciones ocurridas (**Tabla 3.7**), se concluye que el 24/25 de abril de 2017 se produjo un evento de aproximadamente 50 años de recurrencia. Pero estuvo precedido de un evento de alrededor de 5 años de recurrencia el 8/9 de abril. Para el evento del 12/13 de mayo, el más cercano al momento de la falla, se estimó una recurrencia de 2 años.

De este análisis se induce que el puente había estado sometido a un evento extremo significativo aproximadamente 1½ mes antes de la falla, seguido de una solicitación extraordinaria luego de alrededor de 2 semanas (casi 1 mes antes de su falla). La última precipitación relevante antes de la falla ocurrió aproximadamente 5 días antes. De modo que es lógico pensar que se produjeron procesos de erosión local acumulativos que condujeron al colapso del puente, quizás con un mantenimiento insuficiente.

Para completar el análisis, se estimó la altura de agua en el arroyo para el evento de 50 años de recurrencia. Se consideró un ancho de 14 m, una pendiente de 2×10^{-4} , y un coeficiente de Manning de 0,025. Entonces, para el caudal pico de $64 \text{ m}^3/\text{s}$ surge una altura de agua de aproximadamente 3,5 m. Esta altura es del orden de la altura del puente, de modo que no puede descartarse que haya habido un sobrepaso el 24/25 de abril, que debilitó el estribo de margen derecha.

4 CONCLUSIONES

Las siguientes son las principales conclusiones de esta fase de los estudios:

- Si bien la cadena de embalses brasileños y el embalse de Yacyretá constituyen reservorios de deposición de sedimentos, que capturan una parte significativa del material en suspensión (carga de lavado), todavía queda un remanente que se descarga hacia aguas abajo de Yacyretá, capaz entonces de ser capturado por el embalse de Itatí-Itacorá. Además, hay aportes laterales de sólidos transportados por la escorrentía, siendo dominante el del arroyo Yavebyry, con contribuciones más moderadas del Jaguary, Atinguy y Aguapey.
- En el embalse de Itatí-Itacorá se esperan concentraciones de sedimento fino en suspensión del orden de 5 mg/l, con una reducción muy gradual en la dirección longitudinal. El A^o Yavebyry generará una pluma de turbidez sobre la margen, con concentraciones máximas más elevadas, del orden de 10 mg/l, pero esta se atenuará por dilución en forma relativamente rápida, sobre una distancia del orden de 30 km.
- Las tasas de deposición en el embalse de Itatí-Itacorá serán casi despreciables sobre el curso principal del río, pero podrían llegar hasta aproximadamente 8 mm/año en extensas zonas que en condiciones naturales pertenecen a la planicie de inundación del río, sobre todo sobre margen derecha, así como sobre la isla Apipé. En la zona de margen derecha, aguas abajo de la desembocadura del A^o Yavebyry, se producirán pequeñas zonas de deposición significativa concentrada, con tasas de hasta 2 cm/año, asociadas al aporte lateral del arroyo.
- Para el embalse a cota 59m las zonas con deposición más significativa sobre las planicies de inundación se reducirán respecto del caso a cota 61m, debido al incremento de la dinámica del flujo. Por la misma causa, la zona de sedimentación por el aporte del A^o Yavebyry se concentrará aún más cerca de su desembocadura.
- Para las dos situaciones de cota de embalse las tasas de sedimentación esperables son relativamente pequeñas.
- La construcción de la presa de Itatí-Itacorá cortará el transporte de material de fondo (arenas) desde aguas arriba, pudiendo potencialmente generar erosión de fondo en la restitución de la presa.
- Probablemente el lecho del Alto Paraná haya alcanzado un estrato consolidado que impide su profundización bajo la acción de los esfuerzos de corte asociados a las condiciones hidrodinámicas del río.

- No obstante, no puede descartarse que la situación sea de mayor riesgo, por lo cual se determinó cómo se profundizaría el río si el supuesto estrato consolidado se comportara como material suelto no consolidado. El descenso esperado del lecho en la restitución luego de 100 años sería de aproximadamente 10 metros para la Alternativa 1 y de 13 metros para la Alternativa 2. Una tal erosión al pie atentaría contra la estabilidad de la presa, de modo que resulta vital efectuar estudios de suelo que corroboren que existe un estrato consolidado capaz de resistir a la erosión.
- Se efectuó la modelación hidrológica de las subcuencas de aporte al embalse de Itatí-Itacorá desde margen izquierda, a partir de una discretización detallada y utilizando criterios de selección de eventos compatibles con los que se emplearon para la margen derecha.
- Los hidrogramas por subcuenca para los períodos de retorno de 5, 10 y 50 años muestran caudales pico máximos de aproximadamente 30 m³/s, 40 m³/s y 65 m³/s, respectivamente.
- El puente sobre el arroyo Iribú Cuá perteneciente a la Ruta Nacional 12, que se desmoronó el 18 de mayo de 2017, recibe aguas arriba descargas de dos grandes canalizaciones, de aproximadamente 10 km de longitud cada una. El puente había estado sometido a un evento extremo significativo (de alrededor de 5 años de recurrencia) aproximadamente 1½ mes antes de la falla, seguido de una solicitación extraordinaria (de aproximadamente 50 años de recurrencia) luego de alrededor de 2 semanas (casi 1 mes antes de su falla). La última precipitación relevante antes de la falla (con una recurrencia de alrededor de 2 años) ocurrió aproximadamente 5 días antes. De modo que es lógico pensar que se produjeron procesos de erosión local acumulativos que condujeron al colapso del puente, quizás con un mantenimiento insuficiente. Además, la altura de agua en el arroyo para el evento de 50 años de recurrencia es del orden de la altura del puente, de modo que no puede descartarse que haya habido un sobrepaso el 24/25 de abril, que debilitó el estribo de margen derecha.

5 REFERENCIAS

Alarcón, J.J., Szupiany, R., Montagnini, M.D., Gaudín, H., Prendes, H.H. y Amsler, M.L., “Evaluación del transporte de sedimentos en el tramo medio del río Paraná”. RIOS 2003.

Amsler, M.L. y Prendes, H.H. (2000). “Transporte de sedimentos y procesos fluviales asociados” (Capítulo 5: p. 233-306), en: El Río Paraná en su tramo medio. Contribución al conocimiento y prácticas ingenieriles en un gran río de llanura, Tomo 1. Centro de Publicaciones, U.N.L., Santa Fe, Argentina.

Bosio, Chase & Asociados (1975), “Investigaciones Geotécnicas en el área de Itatí – Itacorá”, Informe 183/75.

DNIT, 2005. Manual de Hidrología Básica para Estructuras de Drenaje. Brasil: Departamento Nacional de Infraestructura de Transporte (DNIT).

García M., 2008. Sediment Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practices. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110.

Giambastini, Leiva & Delgado (2017), “Anexo 3 – Estudio Geológico y Geomorfológico del Proyecto Hidroeléctrico Itatí – Itacorá, río Paraná – Informe Final”.

INA (Instituto Nacional del Agua), 2004. Modelo de transporte de sólidos suspendidos en el embalse Yacyretá. Proyecto LHA 224. Informe LHA 04-225-04. Comitente: EBY.

Itaipú Binacional (2017). Levantamiento batimétrico río Paraná tramo Yacyreta – Paso de Patria.

Harrison, A.J.M & Owen, M.W. (1971). Siltation of fine sediments in estuaries, IAHR XIV Congress.

NRCS, 2004. National Engineering Handbook. Chapter 9. Hydrologic Soil-Cover Complexes. Natural Resources Conservation Service. Department of Agriculture. United States.

NHC & EVARSA, 2002, Estudios de Sedimentación Para Actualizar la Definición de la Vida Útil Del Embalse del Complejo Hidroeléctrica Yacyretá.

SCS, 1975. Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Soil Survey Staff. Agriculture Handbook N°436. Washington D.C.

Van Rijn, L.C., 1989. Handbook Sediment Transport by Currents and Waves. Volume 461 of Delft Hydraulics communication. Delft, Netherlands.