



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA



MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA CUENCA DEL RÍO PARANÁ AGUAS ARRIBA DE YACYRETÁ Y ANÁLISIS DE CASOS

Resumen Ejecutivo



*Proyecto LHA 357
Informe LHA 05-357-15
Ezeiza, Setiembre de 2016*

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

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

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Ing. Nicolás D. BADANO

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

INFORME PRODUCIDO POR

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Ing. Nicolás D. BADANO

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA CUENCA DEL RÍO PARANÁ AGUAS ARRIBA DE YACYRETÁ Y ANÁLISIS DE CASOS

Resumen Ejecutivo

RESUMEN

Se presenta una descripción de los estudios ejecutados para implementar el modelo hidrodinámico del río Paraná aguas arriba de Yacyretá. Se describe su aplicación para establecer los efectos de la construcción de Corpus sobre la hidrodinámica del sistema.

Descriptores temáticos: Modelación numérica, modelación hidrodinámica, régimen hidrológico, modelo digital de elevación

Descriptores geográficos: Río Paraná, Río Iguazú, Embalse de Yacyretá, Argentina, Paraguay, Brasil

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	INFORMACIÓN DE BASE	7
2.1	Información hidrométrica	7
2.2	Información topobatimétrica	11
3	MODELO HIDRODINÁMICO	14
3.1	Código Numérico	14
3.2	Implementación	14
3.2.1	Secciones transversales	14
3.2.2	Condiciones de borde	17
3.2.3	Resistencia hidráulica	17
3.3	Calibración	18
3.3.1	Etapa previa al llenado del embalse de Yacyretá	18
3.3.2	Etapa a cota definitiva del embalse de Yacyretá	22
3.3.3	Verificación	25
3.3.4	Efecto de suavización	26
3.4	Extensión	27
4	APLICACIONES DEL MODELO	28

4.1	Planteo	28
4.2	Condiciones hidrológicas normales	29
4.3	Crecidas extremas	36
4.4	Síntesis de sobrelevaciones	46
4.5	Mapas de inundación	48
5	ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE ITAIPÚ	50
5.1	Planteo	50
5.2	Análisis de datos	51
6	CONCLUSIONES	54

1 INTRODUCCIÓN

La Comisión Mixta Argentina-Paraguaya del Río Paraná (COMIP) encargó al Instituto Nacional del Agua (INA), a través del Centro de Estudios de Energía para el Desarrollo (CEED) de la Universidad Nacional de Misiones, la implementación de un modelo hidrodinámico del río Paraná aguas arriba de Yacyretá debidamente calibrado, capaz de dar respuesta a los diversos interrogantes que plantean las intervenciones mediante obras en cuanto a la afectación del régimen hidrológico.

El modelo construido se basó en el modelo numérico hidrodinámico unidimensional implementado para la EBY (Entidad Binacional Yacyretá) durante los estudios para el Plan de Acción frente a Emergencias (En adelante Estudio PAE). Específicamente, de partió del modelo denominado *MOAGAR-2*, que consta de tres ramas (Figura 1.1): (i) Rama Paraná Superior, desde la presa de Itaipú hasta el Punto Trifinio; (ii) Rama Iguazú, desde el pie de las Cataratas hasta el Punto Trifinio; (iii) Rama Alto Paraná, desde el Punto Trifinio hasta el cierre de la presa de Yacyretá.



Figura 1.1. Ramas del modelo unidimensional

El presente estudio incluyó las siguientes actividades:

- A. Análisis de datos topobatimétricos, para generar la representación geométrica del sistema a incorporar al modelo.
- B. Análisis de datos hidrométricos, para caracterizar el régimen hidrológico y generar los datos hidrodinámicos a utilizar en la modelación.
- C. Definición de escenarios a ensayar con el modelo, representativos de las situaciones a estudiar.
- D. Aplicación del modelo hidrodinámico preexistente en el INA, *MOAGAR-2*, desarrollado para la EBY (Entidad Binacional Yacyretá) durante el “Estudio de Impacto de Fallas de Yacyretá para el PAE (Plan de Acción frente a Emergencias)” – en adelante, Estudio PAE.
- E. Ajuste y recalibración del modelo hidrodinámico, en base información actualizada y complementada, generándose el modelo definitivo *MOAGAR-3*.
- F. Aplicación del modelo hidrodinámico *MOAGAR-3*.

Se produjeron un total de cuatro informes parciales:

- En el Primer Informe Parcial (de mayor de 2015) se presentó y analizó la información hidrométrica antecedente, se describió la información topobatimétrica y la construcción del Modelo Digital de Elevación (MDE), y se describió la implementación y calibración del modelo hidrodinámico preliminar.
- En el Segundo Informe Parcial (de agosto de 2015) se amplió la información hidrométrica y topobatimétrica, y se presentó una versión actualizada del modelo hidrodinámico hasta la localidad de Posadas, incluyendo un nuevo criterio de representación de la resistencia hidráulica y un procedimiento automático de calibración, con el cual se simuló escenarios previos al llenado del embalse de Yacyretá y a cota definitiva de ese embalse.
- En el Tercer Informe Parcial (de enero de 2016) se efectuó la calibración definitiva del modelo hidrodinámico, se caracterizó el escenario actual, se analizó la influencia producida por la presencia del embalse de Yacyretá, se ensayaron escenarios futuros con la presa de Corpus construida y se efectuó un análisis de la operación de la presa de Itaipú.
- En el Cuarto Informe Parcial (de julio de 2016) se llevó a cabo el análisis completo de los efectos de la presa de Corpus sobre el régimen hidrodinámico de los ríos Paraná e Iguazú, considerando el efecto de suavizado que impondrá el embalse, y se describió la extensión del modelo para incluir el embalse de Yacyretá.

En este Resumen Ejecutivo se presenta una síntesis de los procedimientos y resultados obtenidos. La organización del Informe es como sigue:

- En el capítulo 2 se puntualiza la información hidrométrica y topobatimétrica utilizada como base.
- En el capítulo 3 se describe la implementación y calibración del modelo hidrodinámico.
- En el capítulo 4 se desarrolla la aplicación del modelo hidrodinámico para analizar la influencia de la construcción de la presa de Corpus.
- En el capítulo 5 se describe un análisis de la operación de la presa de Itaipú
- En el capítulo 6 se vierten las conclusiones del estudio.

2 INFORMACIÓN DE BASE

2.1 Información hidrométrica

Se partió de la base de datos hidrométricos construida durante el Estudio PAE, consistente en series de aforos y series temporales de niveles de agua y caudales diarios, de la cual las 18 estaciones de medición de Argentina, Brasil y Paraguay pertinentes al presente proyecto se muestran en la Figura 2.1 (Primer Informe Parcial). Se recabó mayor información, precisando la existente y eventualmente complementándola (Segundo Informe Parcial).

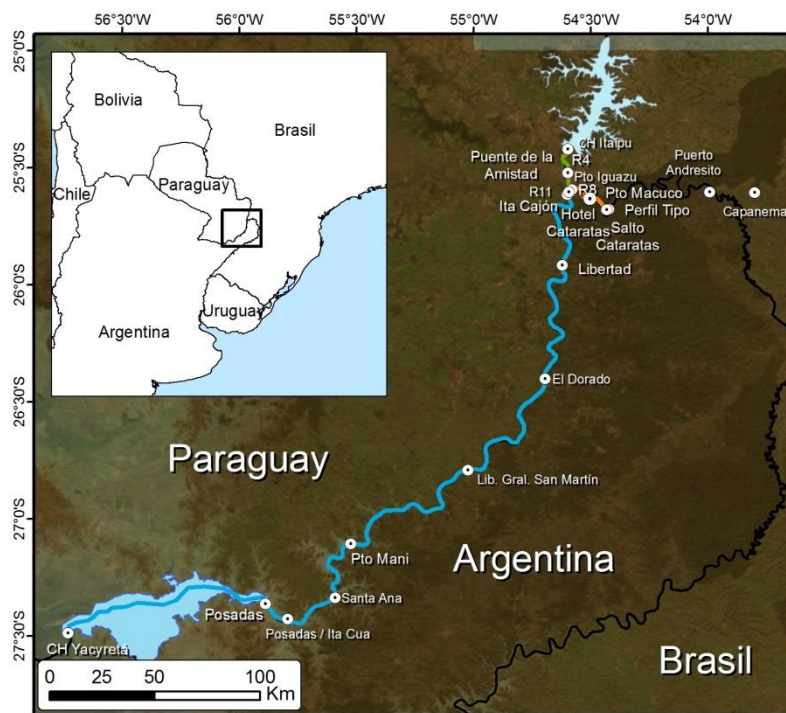


Figura 2.1. Ubicación de las estaciones con información hidrométrica.

A título ilustrativo, a continuación se presentan algunos datos y estadísticas:

- Datos de aforo en la estación Libertado Gral. San Martín, sobre el río Paraná, junto con la curva altura-caudal construida (Figura 2.2).
- Serie de caudales diarios en la estación Capanema, sobre el río Iguazú (Figura 2.3).
- Esquema con los valores de los caudales diarios máximos, medios y mínimos en distintas estaciones (Figura 2.4).
- Las distribuciones de frecuencia acumuladas del caudal diario para estaciones del río Paraná (Figura 2.5).
- Caudales para distintos períodos de retorno correspondientes a distintas estaciones hidrométricas: Capanema (CAP) y Andresito (AND) sobre el río Iguazú, e Itaipú (ITA) y R11 sobre el río Paraná (Tabla 2.1).

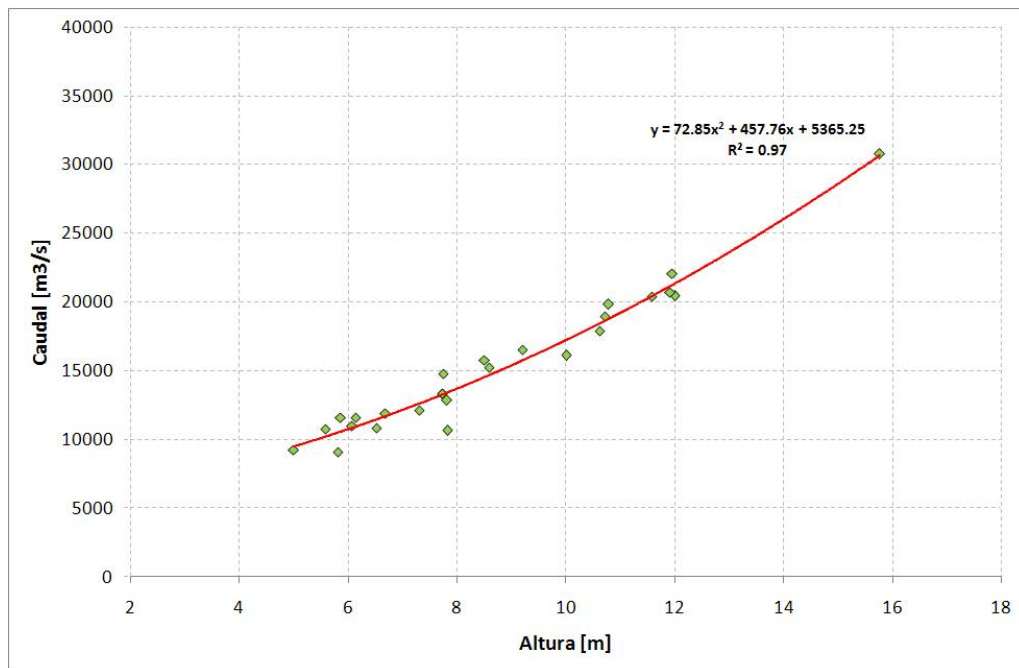


Figura 2.2. Curva altura-caudal Libertador General San Martín – Río Paraná.

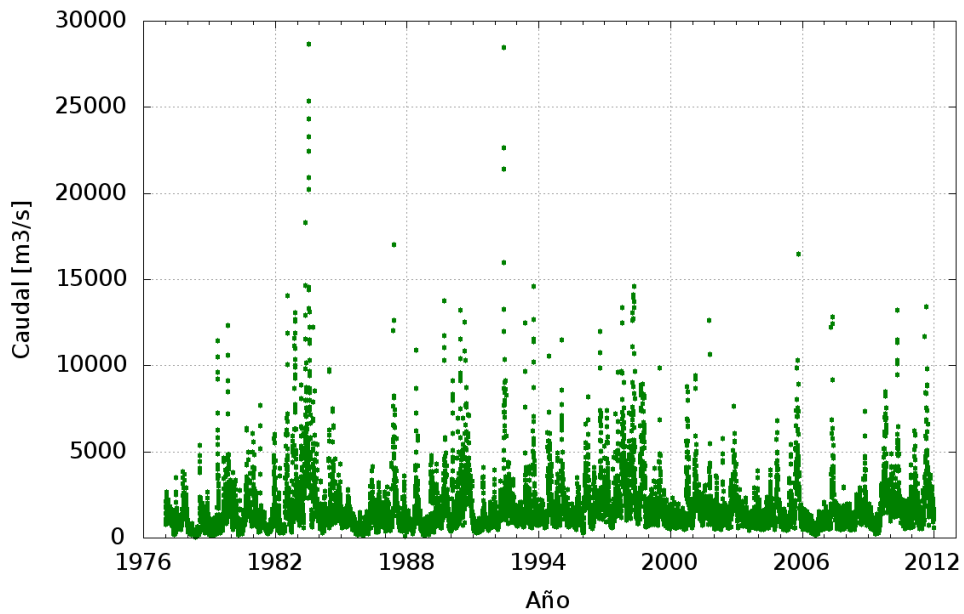


Figura 2.3. Series de caudales diarios en la estación Capanema – Río Iguazú.

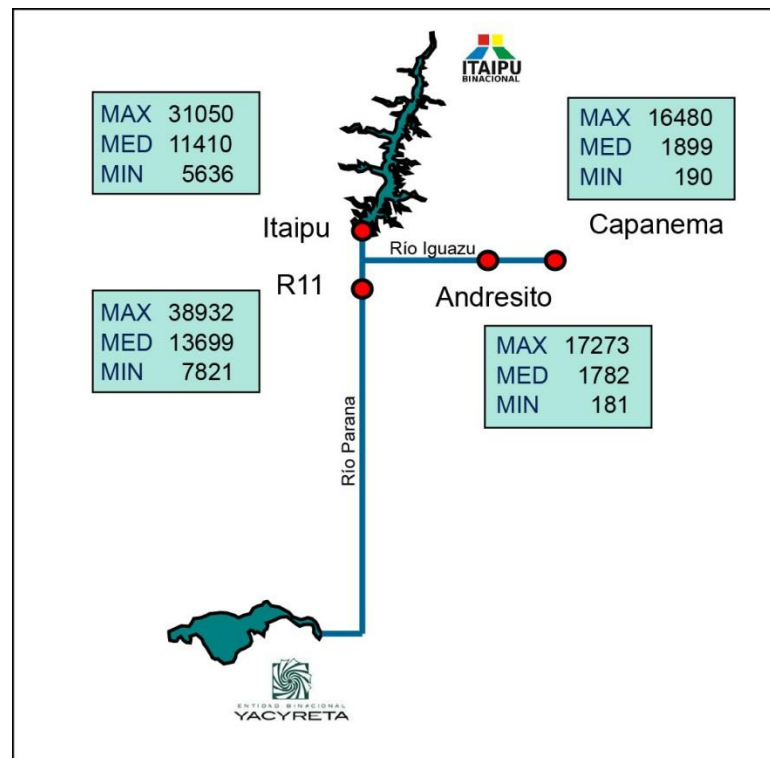


Figura 2.4. Esquema de distribución de caudales.

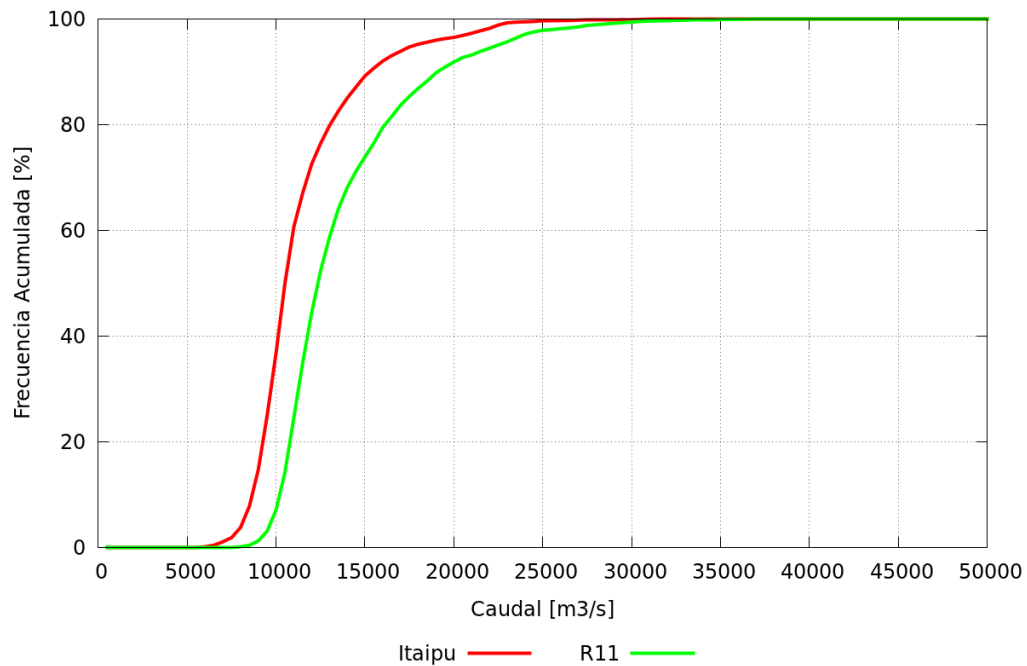


Figura 2.5. Frecuencias acumuladas para estaciones del río Paraná.

Tabla 2.1. Caudales para distintos períodos de retorno (en m^3/s).

Recurrencia (años)	Iguazú		Paraná	
	CAP	AND	ITA	R11
2	9804	9535	20032	24583
5	13544	13685	23982	30879
10	16020	16432	26598	35048
20	18395	19068	29106	39046
50	21469	22479	32354	44222
100	23773	25035	34787	48100

A posteriori se incorporan algunos nuevos ítems de información, a saber (Tercer Informe Parcial):

- Registros de una estación automática en Puerto Macuco, que solo mostraron cierta normalidad durante dos períodos de tiempo relativamente cortos (durante el resto del tiempo se produjo un evidente mal funcionamiento).
- Datos instantáneos del nivel de agua en la progresiva de la estación Puerto Macuco a partir de un relevamiento batimétrico realizado en el río Iguazú.

- Dos versiones de curva altura-caudal para la estación R11, una del ANA y otra de Itaipú Binacional.
- Curvas sintéticas altura-caudal en estaciones hidrométricas del río Paraná de un estudio previo desarrollado para la COMIP¹.

2.2 Información topobatimétrica

Como información topográfica de base se utilizaron los datos satelitales SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), que constituyen un Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno de 90 m de paso. En particular, se seleccionó la versión SRTM v4.1 en banda C, que resultó ser la que minimiza la diferencia de niveles respecto de los correspondientes a los puntos de la Red PASMA (Proyecto de Asistencia a la Minería Argentina) localizados dentro del área de estudio. En la Figura 2.6 se grafica el MDE del terreno, representado como zonas de nivel (Primer Informe Parcial).

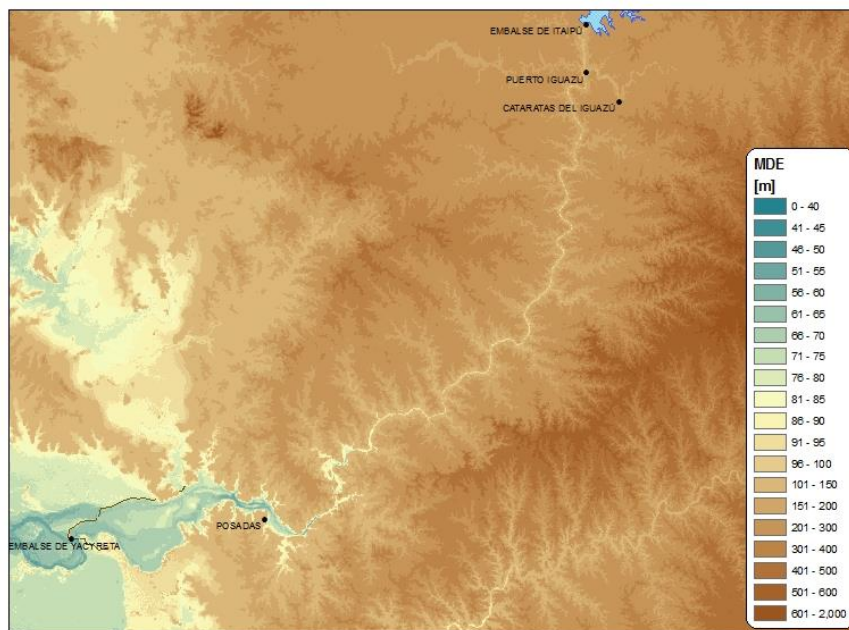


Figura 2.6. Vista del MDE del terreno.

¹ Almirón, 2009. "Funcionamiento hidráulico del tramo Iguazú Posadas del río Paraná". Informe Final

En la Figura 2.7 se indican los tramos para los cuales se contó con datos batimétricos provenientes de distintas fuentes. Para cada uno de los tramos los datos se dispusieron en formato vectorial, se transformaron a formato TIN (Red de Triángulos Irregulares) sobre el cauce del río, y fueron interpolados a una malla de celdas regulares (RASTER) de 90 metros, generándose así un MDE del cauce con el mismo paso que el MDE del terreno.

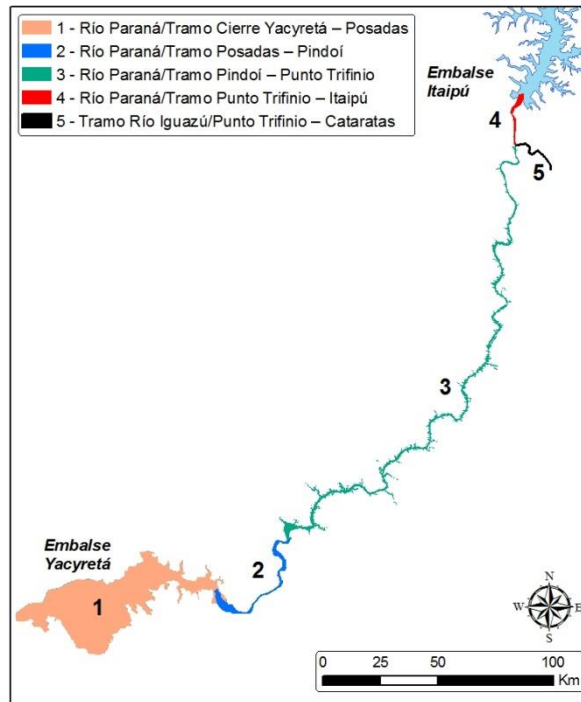
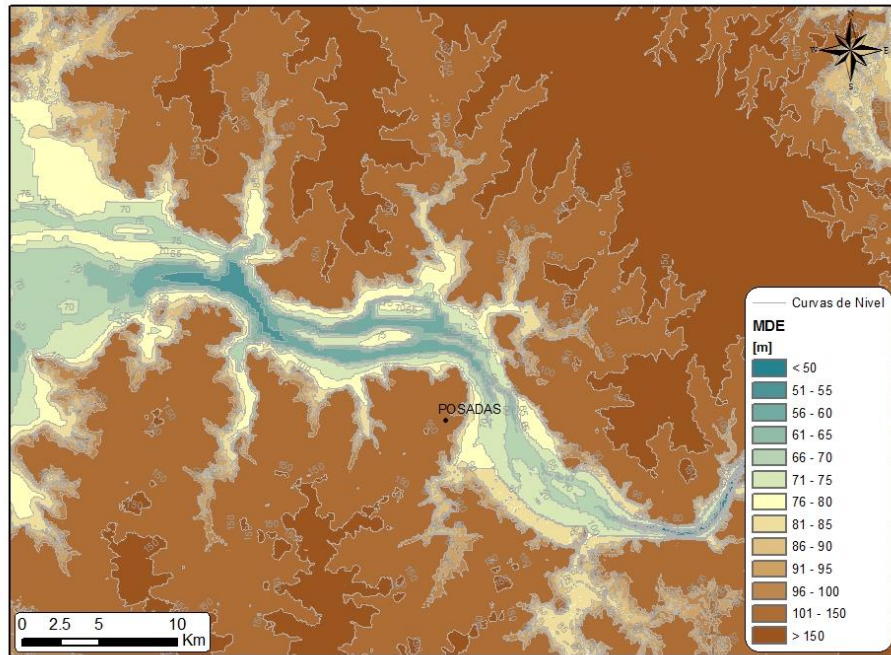
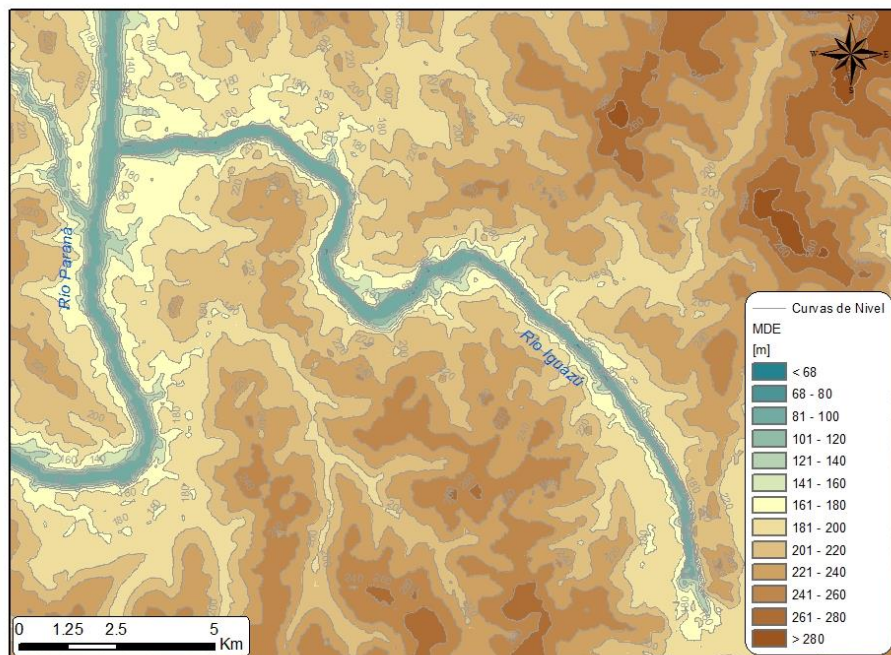


Figura 2.7. *Tramos con distintas fuentes de datos.*

Se acoplaron entre sí el MDE del terreno y los MDE del cauce, obteniéndose un MDE General, con un paso de 90 metros y en coordenadas UTM 21S. A título ilustrativo, en la Figura 2.8 se muestran dos vistas parciales del MDE General correspondientes a una zona del embalse de Yacyretá, en las cercanías de Posadas, y una del río Iguazú.



a) Cola del embalse de Yacyretá.



b) Río Iguazú.

Figura 2.8. Vistas del MDE General.

3 MODELO HIDRODINÁMICO

3.1 Código Numérico

Para la modelación se adoptó el uso del software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System). Se trata de un código desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los EEUU (USACE) para la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant, que modelan el escurrimiento unidimensional (1D)².

El HEC-RAS es un software ampliamente utilizado y aceptado para la modelación 1D, que se encuentra bajo mantenimiento y desarrollo permanente por parte del USACE. Las condiciones de borde en los extremos (externas) – de tipo caudal, nivel de agua ó una relación entre esas dos variables – pueden representar forzantes ó condicionantes del movimiento. Pero también cuenta con herramientas para la esquematización de condiciones de borde internas, tales como estructuras hidráulicas (puentes, alcantarilla y vertederos transversales ó laterales al escurrimiento, entre otras), incluyendo políticas de operación asociadas.

3.2 Implementación

3.2.1 Secciones transversales

Las secciones transversales del modelo *MOAGAR-2*, considerado como preliminar, surgieron de generar cortes al MDE, lo cual es considerado suficiente para una buena representación de la planicie de inundación. La representación resultante del cauce se enriqueció con datos originales disponibles (Primer Informe Parcial). A título ilustrativo, en la Figura 3.1 se indica la ubicación de las secciones transversales en el tramo Itaipú a Punto Trifinio.

² <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>

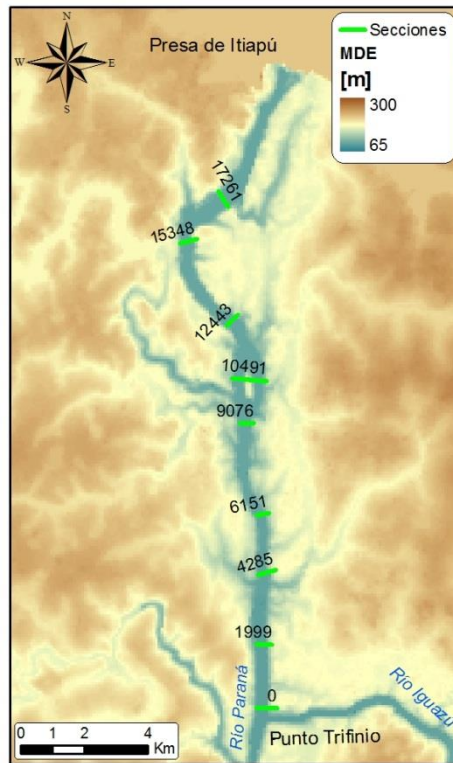


Figura 3.1. Ubicación de secciones transversales para el tramo Itaipú - Punto Trifinio.

Al model *MOAGAR-3* se incorporaron 16 secciones transversales adicionales provenientes del modelo *Corpus2009* disponible en la COMIP, la mayoría de las cuales corresponden a batimetrías realizadas durante el año 2008 en la zona de la isla Pindoí, alcanzándose así un total de 78 secciones transversales, con un espaciamiento medio de 4,3 km. Además se introdujeron nuevas secciones por interpolación geométrica cada aproximadamente 2000 m, obteniéndose un total de 273 secciones, con el objeto de disminuir los errores numéricos y tener mayor uniformidad en el paso espacial entre secciones (Segundo Informe Parcial).

Los datos batimétricos disponibles del río Iguazú surgieron de un relevamiento efectuado en el año 2011 por Itaipú Binacional³, extendiéndose desde su desembocadura en el río Paraná hasta el ingreso a la zona de Cataratas del Iguazú, unos kilómetros aguas abajo de la Isla San Martín (Figura 3.2). Se incorporó el tramo faltante hasta el pie de las Cataratas, representando un 'brazo corto' hasta el salto San Martín, con 2 secciones transversales, y

³ Itaipú Binacional, 2011. "Informe de levantamiento batimétrico del río Iguazú. Cataratas del Iguazú y la desembocadura del río Iguazú", Dirección Técnica, Superintendencia de Operación, División de Estudios Hidrológicos y Energéticos.

un 'brazo largo' hasta la Garganta del Diablo, con 7 secciones (Figura 3.3). Estas secciones se construyeron en forma estimativa respetando el ancho y la tipología de las formas (existencia de saltos) a partir de imágenes y videos de la zona (Tercer Informe Parcial).

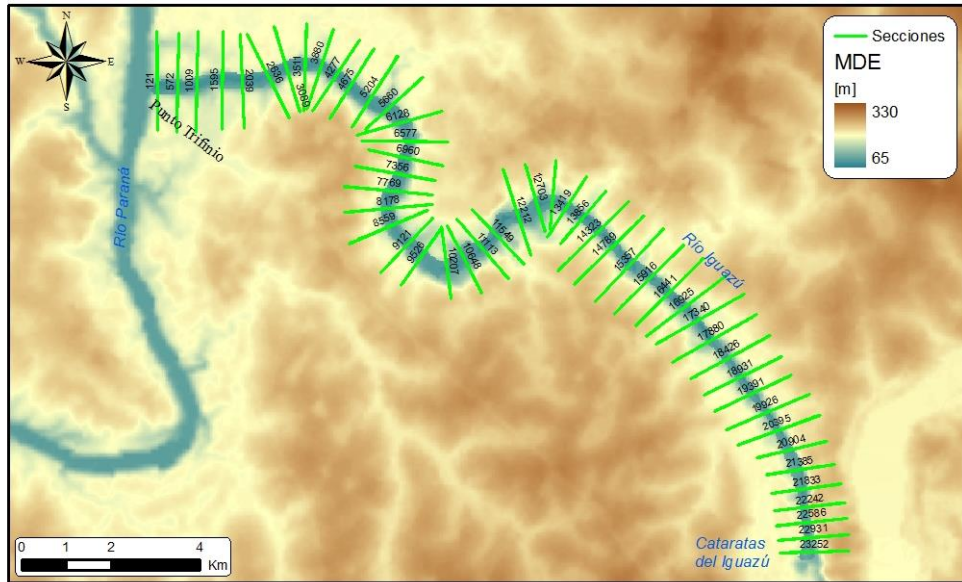


Figura 3.2. Ubicación de secciones transversales para el tramo Cataratas - Punto Trifinio.

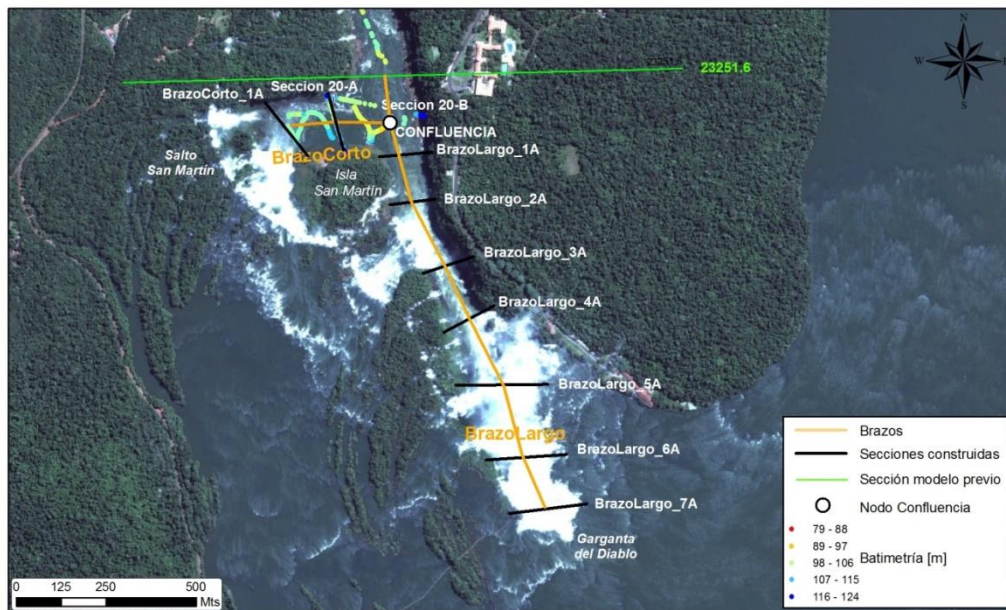


Figura 3.3. Extensión del modelo del río Iguazú hasta el pie de las Cataratas. En negro las secciones transversales del modelo; en verde la última sección transversal del modelo anterior; en gama roja a azul los datos batimétricos.

Además de las características estrictamente geométricas de las secciones transversales, también se identificaron zonas de almacenamiento, donde la velocidad de flujo es muy baja al menos para niveles de agua no muy elevados. Para representar estas zonas el código HEC-RAS dispone de la posibilidad de identificar *áreas inefectivas* dentro de una sección transversal, en las cuales asume que la velocidad es nula mientras el nivel de agua permanece por debajo de un dado valor umbral. Esto permite computar correctamente los volúmenes de agua, sin que esto implique un escurrimiento longitudinal en toda la sección. Para niveles de agua mayores al valor umbral, típicamente durante las crecidas, las *áreas inefectivas* pasan a ser parte de la sección hidrodinámicamente activa.

3.2.2 Condiciones de borde

El modelo principal se cortó en la ciudad de Posadas, donde se dispone de registros hidrométricos históricos. Luego se implementó una versión extendida (ver sección 3.4).

Las condiciones de borde del modelo son las siguientes:

- i. Aguas arriba sobre río Paraná: serie de caudales en Itaipú
- ii. Aguas arriba sobre río Iguazú: serie de caudales en Cataratas
- iii. Aguas abajo sobre río Paraná: serie de niveles (ver más abajo)

La proporción del caudal total del río Iguazú asignada a cada rama se estableció de manera proporcional al ancho de los saltos medido sobre una imagen satelital (Tercer Informe Parcial).

No se tienen en cuenta aportes laterales, es decir, se consideraron poco relevantes. Esta hipótesis se verificó analizando datos de los mayores aportes laterales al Alto Paraná (Tercer Informe Parcial), que provienen de la margen izquierda (Provincia de Misiones, Argentina).

3.2.3 Resistencia hidráulica

La resistencia hidráulica se expresa a través de la ley de Chezy-Manning, que tiene como parámetro al coeficiente de rugosidad de Manning, n .

Se planteó una zonificación para establecer la distribución espacial de los valores del coeficiente de Manning de base – el asociado a condiciones de estiaje a medias –, y luego se introdujeron factores multiplicativos de corrección dependientes del caudal, de modo de ajustar la respuesta para los caudales de crecida (Primer Informe Parcial). Tanto los valores de base como los factores multiplicativos fueron ajustados durante la calibración.

A los efectos del cálculo, el modelo hidrodinámico opera en base a la conductividad hidráulica (*conveyance* en inglés), parámetro inverso a la resistencia hidráulica, el cual depende tanto de la textura de la superficie (rugosidad de Manning) como de parámetros geométricos. Para calcular la conductividad hidráulica, cada sección transversal se dividió

en fajas verticales (Figura 3.4), separando zonas donde la velocidad media difiere (en particular, las márgenes de la sección principal)⁴; la conductividad total se calcula como la suma de las conductividades individuales de cada faja (Segundo Informe Parcial). Esto resulta particularmente apropiado para las secciones anchas y compuestas del Paraná.

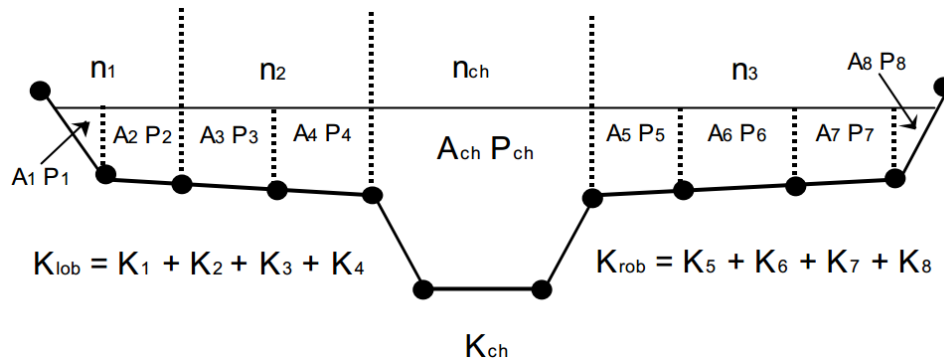


Figura 3.4. Esquematización de la sección transversal en fajas.

3.3 Calibración

3.3.1 Etapa previa al llenado del embalse de Yacyretá

Se efectuó la calibración del modelo MOAGAR-3 operándolo solamente hasta la ciudad de Posadas, donde se dispone de una larga serie temporal. El tramo restante, hasta la Central Hidroeléctrica Yacyretá (CHY) se incorporó a posteriori (ver sección 3.4). Se utilizó como escenario de calibración la etapa previa al llenado del embalse de Yacyretá, sobre el período 1983-1994.

Para la calibración del modelo se utilizaron como funciones objetivo las series de niveles en las siguientes estaciones: Ita Cuá, Santa Ana, San Martín y El Dorado en el tramo Posadas-Punto Trifinio (Alto Paraná), Puente La Amistad en el tramo Punto Trifinio-Itaipú (Paraná Superior) y Puerto Iguazú (Iguazú).

Los parámetros básicos de calibración fueron los coeficientes de rugosidad de Manning, que se consideraron uniformes en los tramos entre las estaciones de calibración. Eventualmente se apeló a imponer una curva de factor de rugosidad por tramo, es decir, un factor de modulación del coeficiente de Manning con el caudal.

⁴ Weber, J., 2003. "Modelación integrada uni y bidimensional de flujo en planicies de inundación". Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, marzo.

Para cada tramo se consideraron dos valores del coeficiente de rugosidad de Manning: uno para el cauce y otro para la planicie. El primero se aplica al cauce principal y a las zonas bajas aledañas a este, en principio sin vegetación espesa. El valor de planicie se aplica al resto, que son zonas más altas, con mayor densidad y envergadura de vegetación. Se adoptó como nivel de corte entre ambas zonas aquel que solo se anega el 5% del tiempo.

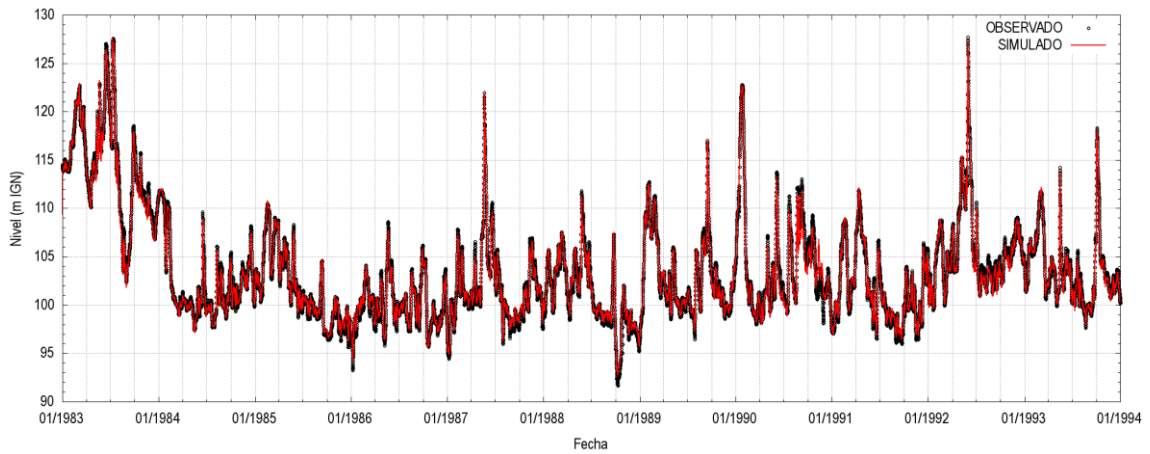
Se desarrolló un algoritmo automático para calibrar el modelo. El programa de auto-calibración modifica los archivos de entrada del HEC-RAS y ejecuta el modelo una gran cantidad de veces, ajustando iterativamente cada parámetro, dentro de su rango de valores posibles preindicados, hasta minimizar un indicador de bondad de ajuste.

Los valores resultantes de aplicar este algoritmo, y que fueron adoptados para el modelo MOAGAR-3, se presentan en la Tabla 3.1. Los únicos tramos para los cuales fueron necesarias curvas de factor de rugosidad fueron los dos primeros.

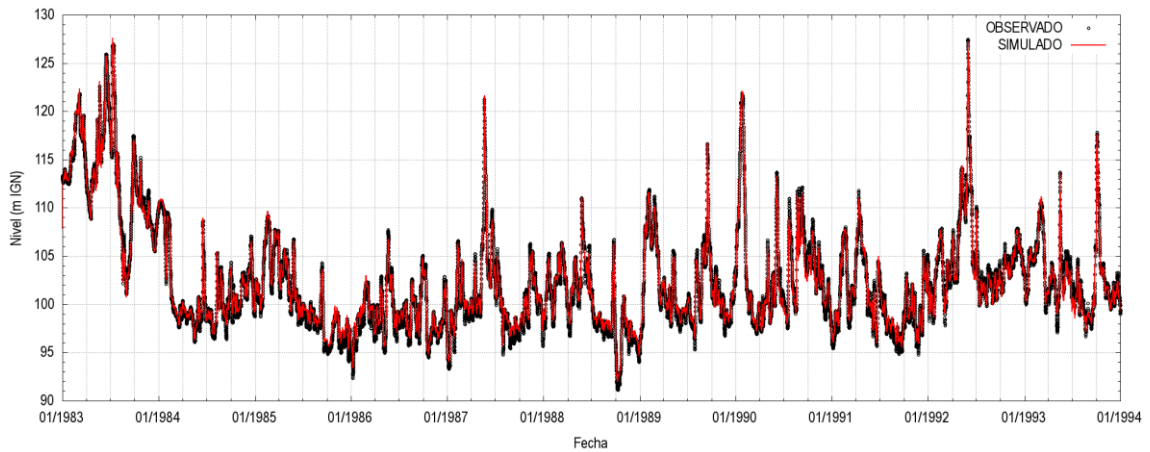
Tabla 3.1. Coeficientes de Manning luego de la calibración para la etapa previa al llenado.

Tramo	Manning de cauce	Manning de planicie
Tramo 1, Posadas - Ita Cuá	0,0421	0,10
Tramo 2, Ita Cuá – Santa Ana	0,0495	0,10
Tramo 3, Santa Ana – San Martín	0,0400	0,10
Tramo 4, San Martín – El Dorado	0,0457	0,10
Tramo 5, El Dorado – Punto Trifinio	0,0474	0,17
Tramo 6, Punto Trifinio – Itaipú	0,0536	0,10
Tramo 7, Punto Trifinio - Cataratas	0,0750	0,10

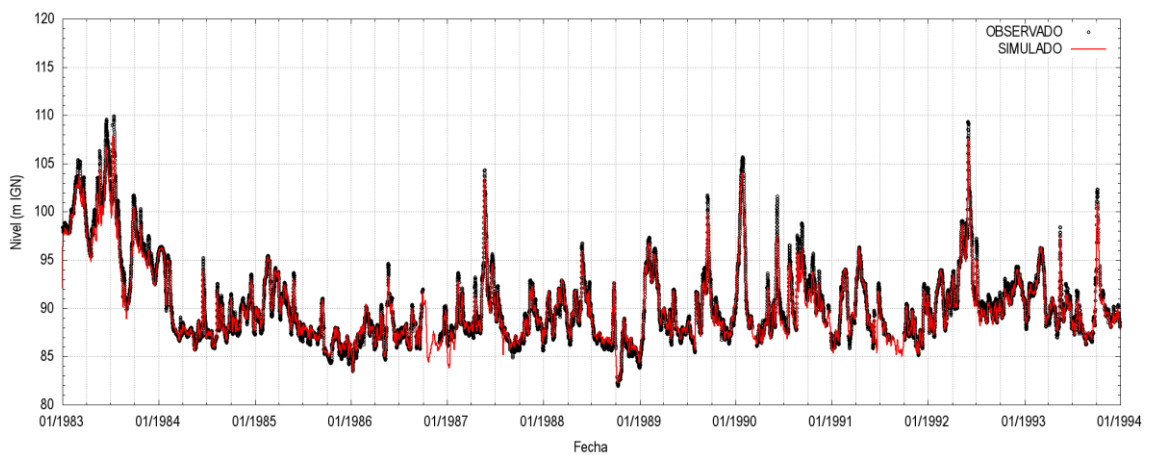
En la Figura 3.5 se presenta la comparación entre niveles observados y simulados luego de la calibración para todas las estaciones. Se observa un acuerdo muy satisfactorio para todas ellas. Esto se refleja en los indicadores de bondad de ajuste, mostrados en la Tabla 3.2.



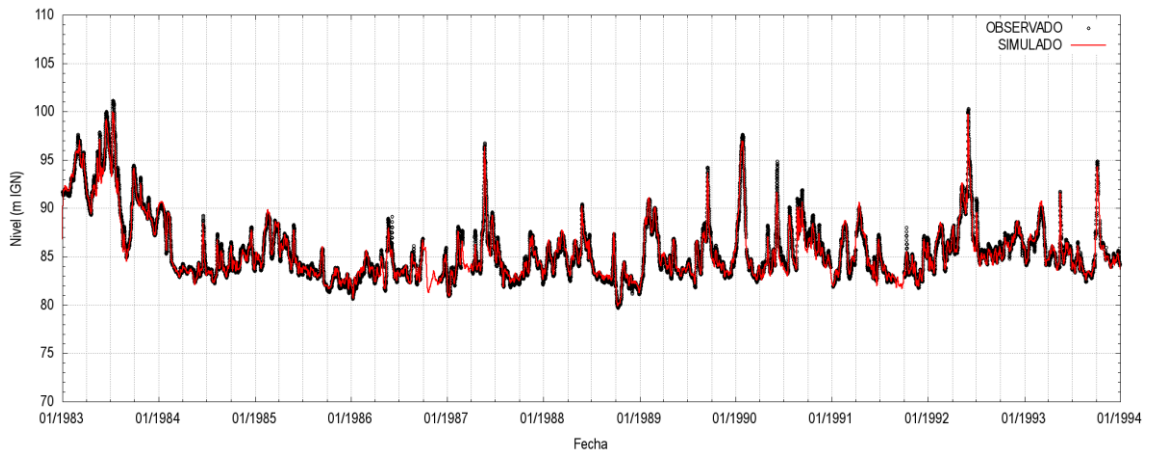
a) Puente de la Amistad



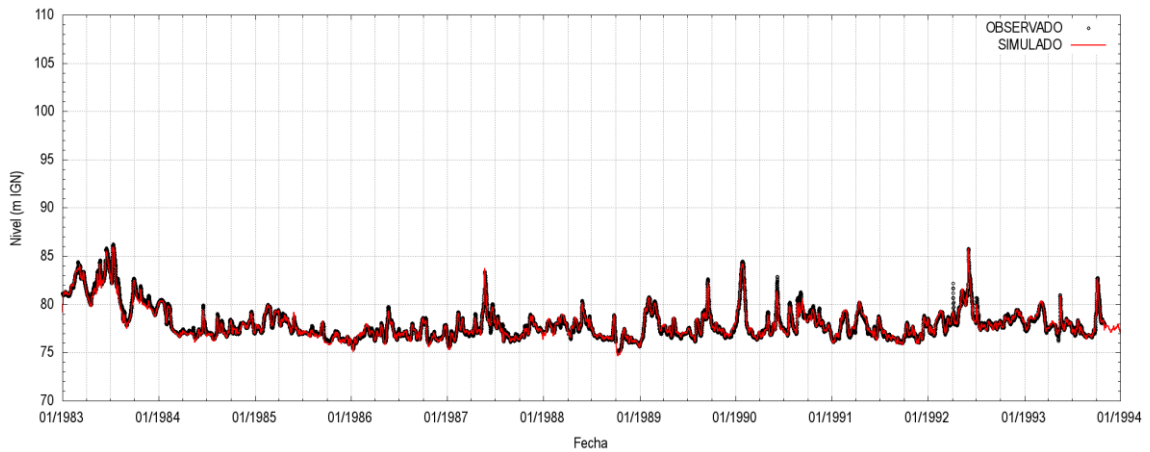
b) Puerto Iguazú



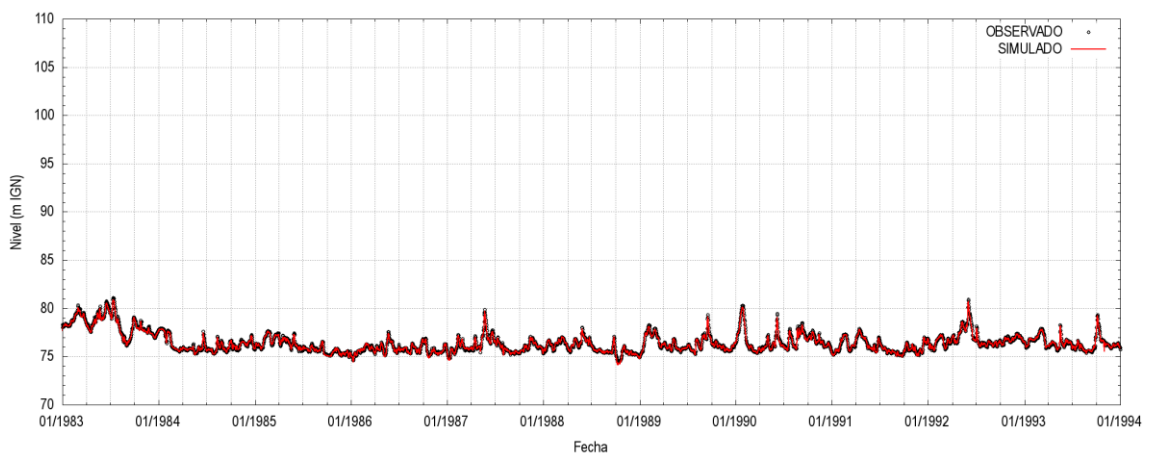
c) El Dorado



d) Libertador Gral. San Martín



e) Santa Ana



f) Posadas Ita Cuá (condición de borde)

Figura 3.5. Comparación entre niveles observados y simulados para la etapa previa al llenado.

Tabla 3.2. Indicadores de bondad de ajuste para la etapa previa al llenado en las estaciones de calibración.

Estación	MED (m)	RMSE (m)	R ²	NSE
Puerto Iguazú	-0,10	0,62	0,99	0,99
Puente de la Amistad	0,07	0,50	0,99	0,99
El Dorado	0,20	0,68	0,98	0,98
Libertador Gral. San Martín	0,05	0,42	0,98	0,98
Santa Ana	0,04	0,24	0,98	0,98
Posadas Ita Cuá	0,04	0,09	0,99	0,99

3.3.2 Etapa a cota definitiva del embalse de Yacyretá

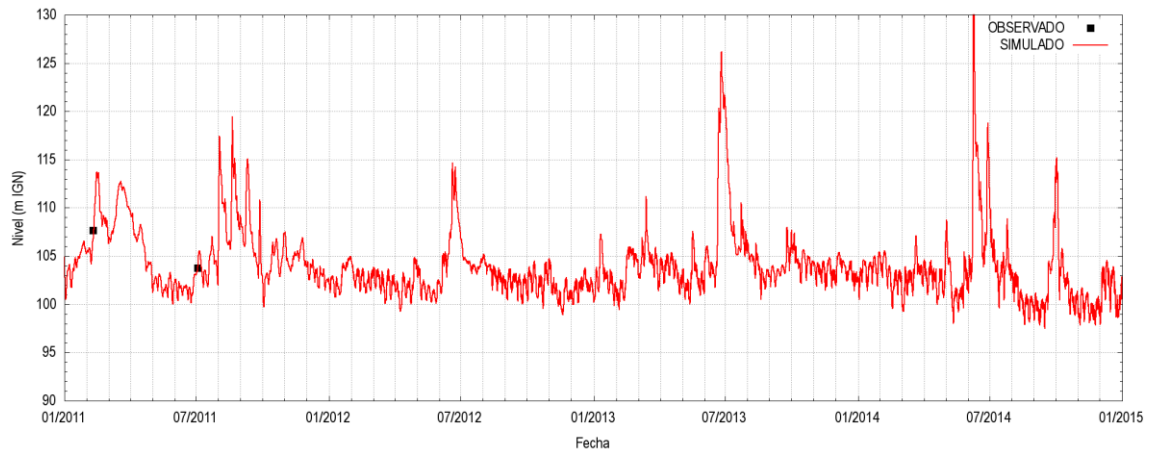
Al aplicar el modelo *MOAGAR-3* (calibrado para la etapa previa al llenado de Yacyretá) para simular la etapa a cota definitiva del embalse, se observó un sesgo sistemático del modelo a sobrestimar los niveles. Este sesgo estaría indicando la ocurrencia de una suavización del cauce del río debido a la presencia del embalse de Yacyretá, efecto que se analiza en la sección 3.34. Se procedió por lo tanto a la recalibración del modelo *MOAGAR-3* para la etapa a cota definitiva, sobre el la ventana de tiempo que se extiende entre abril de 2011 y enero de 2015. Cabe destacarse que para este período no se cuenta con registros en las estaciones de calibración Ita Cuá y Puente de la Amistad, y que los registros en la estación Santa Ana fueron discontinuados, reiniciándose su lectura recién a partir de abril de 2013. Además, se emplearon datos puntuales de nivel de agua registrados en la estación Puerto Macuco.

La Tabla 3.3 presenta los valores de rugosidad de cauce y de planicie calibrados para la etapa a cota definitiva, repitiéndose los correspondientes al escenario previo al llenado de Yacyretá como referencia. Se observa que las reducciones del coeficiente de rugosidad del cauce son significativas, tanto más cuanto más cerca de la presa.

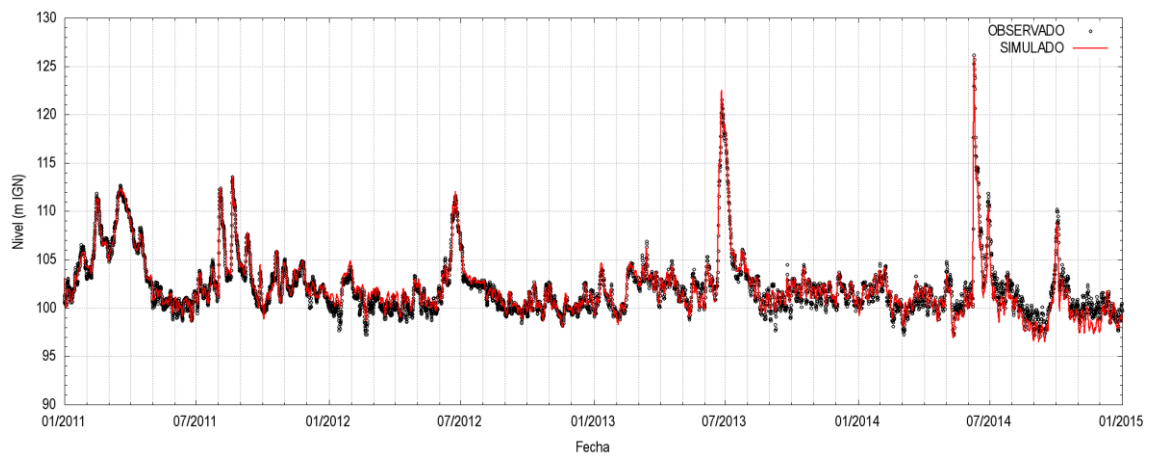
Tabla 3.3. Coeficientes de Manning para las etapas previa al llenado y a cota definitiva

Tramo	Previa Yacyretá		Cota definitiva	
	Manning de cauce	Manning de planicie	Manning de cauce	Manning de planicie
Tramo 1, Posadas - Ita Cuá	0,0421	0,10	0,0255	0,10
Tramo 2, Ita Cuá – Santa Ana	0,0495	0,10	0,0300	0,10
Tramo 3, Santa Ana – San Martín	0,0400	0,10	0,0379	0,13
Tramo 4, San Martín – El Dorado	0,0457	0,10	0,0466	0,10
Tramo 5, El Dorado – Punto Trifinio	0,0474	0,17	0,0453	0,17
Tramo 6, Punto Trifinio - Itaipú	0,0536	0,10	0,0503	0,10
Tramo 7, Punto Trifinio - Cataratas	0,0750	0,10	0,0750	0,10

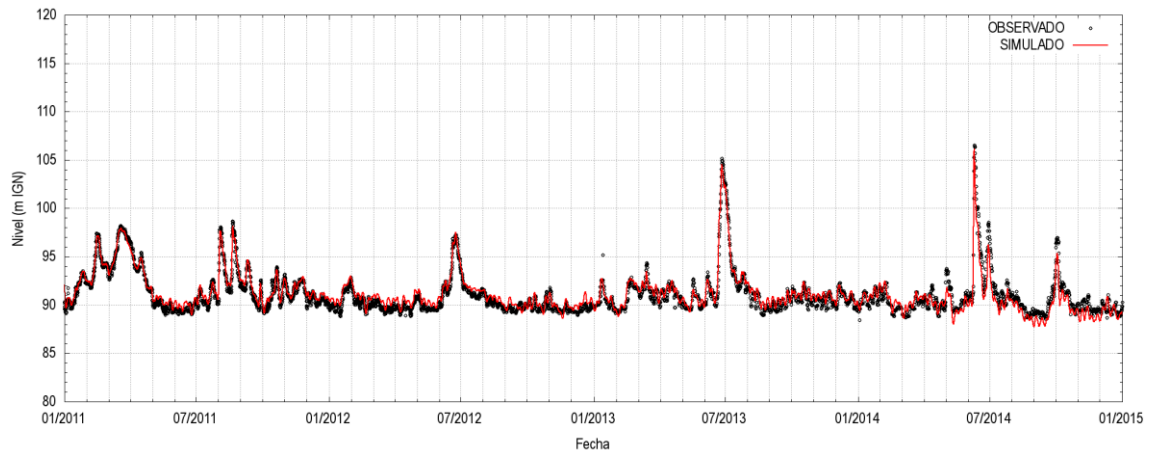
La Figura 3.6 muestra la comparación entre niveles observados y simulados luego de la calibración para la etapa a cota definitiva, observándose un acuerdo muy satisfactorio para todas ellas, lo cual se refleja en los indicadores de bondad de ajuste, mostrados en la Tabla 3.4.



a) Puerto Macuco



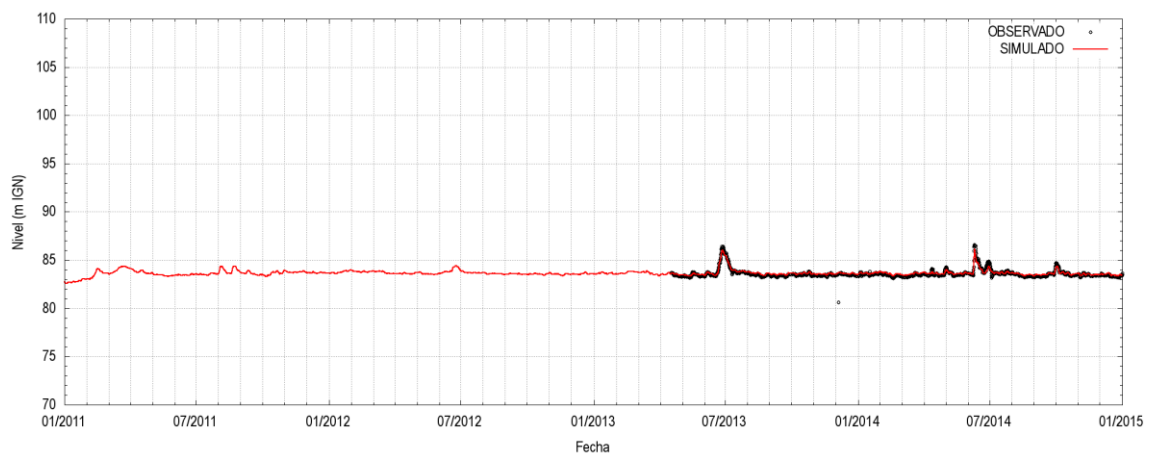
b) Puerto Iguazú



c) El Dorado



d) Libertador Gral. San Martín



e) Santa Ana

Figura 3.6. Comparación entre niveles simulados y observados para etapa a cota definitiva.

Tabla 3.4. Indicadores de bondad de ajuste para la etapa previa al llenado en las estaciones de calibración.

Estación	MED (m)	RMSE (m)	R ²	NSE
Puerto Iguazú	-0,10	0,62	0,99	0,99
Puente de la Amistad	0,07	0,50	0,99	0,99
El Dorado	0,20	0,68	0,98	0,98
Libertador Gral. San Martín	0,05	0,42	0,98	0,98
Santa Ana	0,04	0,24	0,98	0,98
Posadas Ita Cuá	0,04	0,09	0,99	0,99

3.3.3 Verificación

Para verificar el modelo se utilizó la siguiente información:

- Niveles registrados en la estación R11 para el escenario previo al llenado de Yacyretá.
- Registros de niveles de la estación automática de Puerto Macuco para el escenario a cota definitiva.
- Curva altura-caudal en la estación Libertador General San Martín.

El nivel de acuerdo entre observaciones y modelo en la estación R11, tanto para el escenario previo como el posterior al llenado, resultó excelente en ambos casos, aunque aparecen algunas discrepancias durante el año 2011 que parecen deberse a deficiencias en los valores observados (Tercer Informe Parcial).

Tal como se explicó en la sección 2.1, se rescataron dos ventanas de tiempo para las cuales la estación automática en Puerto Macuco proveyó datos razonables. Cabe aclarar que el cero provisto era erróneo, lo cual explica la imposibilidad de utilizarlos para calibrar el modelo. De hecho, el cero se ajustó durante la verificación de modo de reproducir correctamente el valor medio, resultando de +96,84 mIGN. Se obtuvo un acuerdo muy bueno durante la primera ventana de tiempo. Durante la segunda ventana de tiempo la comparación resultó buena en términos generales, aunque se observaron varios períodos durante los cuales los datos registrados permanecen constantes, lo que se asocia a los problemas de malfuncionamiento del aparato (Tercer Informe Parcial).

Los aforos efectuados entre 2008 y 2015 en la estación Libertador San Martín indican claramente la desviación introducida por el llenado del embalse para bajos caudales por el efecto de remanso. La comparación entre aforos efectuados en el período 2008-2009 y resultados del modelo para la etapa previa al llenado de Yacyretá resultó muy satisfactoria (a pesar de que ya existía el embalse de Yacyretá; pero este aún se encontraba en una cota reducida, con lo cual prácticamente no afectaba la relación altura-caudal en Libertador General San Martín). También se observó un muy buen acuerdo entre aforos efectuados en el año 2011 y resultados del modelo para la etapa a cota definitiva. En cambio, se observaron discrepancias entre los aforos llevados a cabo entre 2011 y 2015, y los resultados del modelo para la etapa a cota definitiva, ya que los primeros tienden a ser

sistemáticamente mayores (y de hecho más compatibles con los resultados del modelo para la etapa previa al llenado). Se verificó que estos caudales aforados no son compatibles con los caudales informados por Itaipú para esas fechas, por lo cual se considera que existe alguna anomalía en los aforos.

3.3.4 Efecto de suavización

La modelación ha indicado que se produce una suavización efectiva del cauce al pasar de la etapa previa al llenado de Yacyretá a la del embalse a cota definitiva. Se identificaron a priori tres causas como las principales que deberían contribuir a este fenómeno:

- Disminución de la altura de las formas de fondo por el aumento de nivel y la disminución de la velocidad, con el consiguiente decremento de la resistencia por forma (transferencia de energía a los torbellinos de eje horizontal por desprendimiento de la capa límite de fondo).
- Disminución del gradiente de tensiones de corte entre el flujo encauzado y en planicie por la disminución de la diferencia relativa de profundidad, con el consiguiente decremento de la intensidad de los torbellinos de eje vertical.
- Disminución de la resistencia por forma de la vegetación de la planicie, al descomponerse y eventualmente desaparecer.

Se efectuaron análisis para cuantificar estos efectos.

En el Alto Paraná el cauce es de arena, y se producen formas de fondo de tipo dunas que son las que contribuyen significativamente a determinar la resistencia hidráulica efectiva al flujo de agua, la cual se cuantifica en términos de la rugosidad efectiva expresada como el coeficiente de Manning. Se utilizó la teoría desarrollada por van Rijn (Tercer Informe Parcial).

Para el Tramo 3 (entre estaciones Santa Ana y San Martín), en el cual se produjo una disminución del 5,2% en el valor de Manning del cauce, la teoría explicó muy satisfactoriamente los valores de calibración para ambas etapas, lo cual indica que el cambio de régimen hidrodinámico por la presencia de la presa (mayores tirantes y menores velocidades) produce la suavización efectiva del cauce a través de la disminución de la altura de las formas de fondo.

En el caso del Tramo 2 (entre estaciones Ita Cuá y Santa Ana) se produjo una disminución del 39%. Si bien parte de la rugosidad efectiva proviene de la pérdida hacia los torbellinos de eje vertical, la suavización efectiva del cauce también se da a través de la disminución de la altura de las formas de fondo debido al cambio de régimen hidrodinámico por la presencia de la presa.

Las suavizaciones de los tramos 5 y 6 ya no pueden asignarse al efecto de remanso de la presa de Yacyretá. Si bien seguramente este efecto también se debería poder explicar por la disminución de las alturas de las formas de fondo, la causa de esta disminución debería estar asociada a la operación de la presa de Itaipú, que impone un régimen diario en el que predominan durante la mayor parte del tiempo velocidades de corriente menores a las del antiguo régimen natural.

Se considera que la disminución de la resistencia por forma de la vegetación de la planicie constituye una contribución menor. Esto se verificó mediante un análisis de sensibilidad a la rugosidad de la margen (Cuarto Informe Parcial).

3.4 Extensión

El modelo calibrado se extiende hasta la localidad de Posadas, donde se dispone de registros para fijar condiciones de borde.

Se generó una versión extendida hasta el cierre de la presa de Yacyretá. Las secciones transversales del tramo adicional del modelo, sobre el embalse de Yacyretá, fueron generadas a partir del MDE disponible. Esta extensión, que consta de una sola rama, sigue como trayectoria la dirección principal del flujo hasta la sección coincidente con la presa Principal (Cuarto Informe Parcial).

Las condiciones de borde se implementaron para tener en cuenta tanto el nivel del embalse como la erogación por sus distintas estructuras:

- En las secciones transversales lindantes con el vertedero Aña Cuá se impone, como vertedero lateral, el caudal saliente erogado por esa estructura.
- En la penúltima sección se aplica, como vertedero lateral, el caudal saliente calculado como suma de los erogados por el vertedero Principal y la Central.
- En la sección de aguas abajo se impone el nivel observado en la esclusa de navegación de la presa.

4 APLICACIONES DEL MODELO

4.1 Planteo

Ante la construcción de la presa de Corpus se producirán efectos sobre las condiciones hidrodinámicas de la zona de estudio. En particular, resulta importante cuantificar estos efectos en tres zonas características: el pie de las Cataratas del Iguazú, el pie de la presa de Itaipú, y el Punto Trifinio.

El modelo matemático construido es la herramienta pertinente para predecir la nueva situación, de modo que se la utilizó con este propósito.

La presa de Corpus se implementó como una condición de borde interna de nivel constante (en la progresiva 1656,7 Km). De esta manera no se tuvieron en cuenta ni las variaciones intradiarias producidas por su empuntamiento, ni posibles políticas de laminación de crecidas.

Para representar la variabilidad hidrológica intra e interanual, se tomó como ventana de tiempo de simulación a la comprendida entre enero de 1983 y diciembre de 2014.

Se utilizaron los caudales registrados en Itaipú y en Salto Cataratas como condición de borde de agua arriba.

Se fijó como condición de borde de aguas abajo un nivel constante de 83 mIGN en Posadas, compatible con la política de operación de la represa Yacyretá a cota definitiva.

Se establecieron tres cotas posibles para el embalse de Corpus: 105, 100 y 95 mGN. También se simuló el escenario actual, sin la presa de Corpus.

Se aplicó el tratamiento para prever el suavizado que podría esperarse por la construcción de Corpus. El análisis de formas de fondo se llevó a cabo para cuatro estaciones ubicadas aguas arriba de la presa de Corpus: San Martín, El Dorado, R11 y Puente de la Amistad. La rugosidad de las formas de fondo se estimó para la situación anterior y posterior a Corpus, considerada ésta a distintas cotas de embalse.

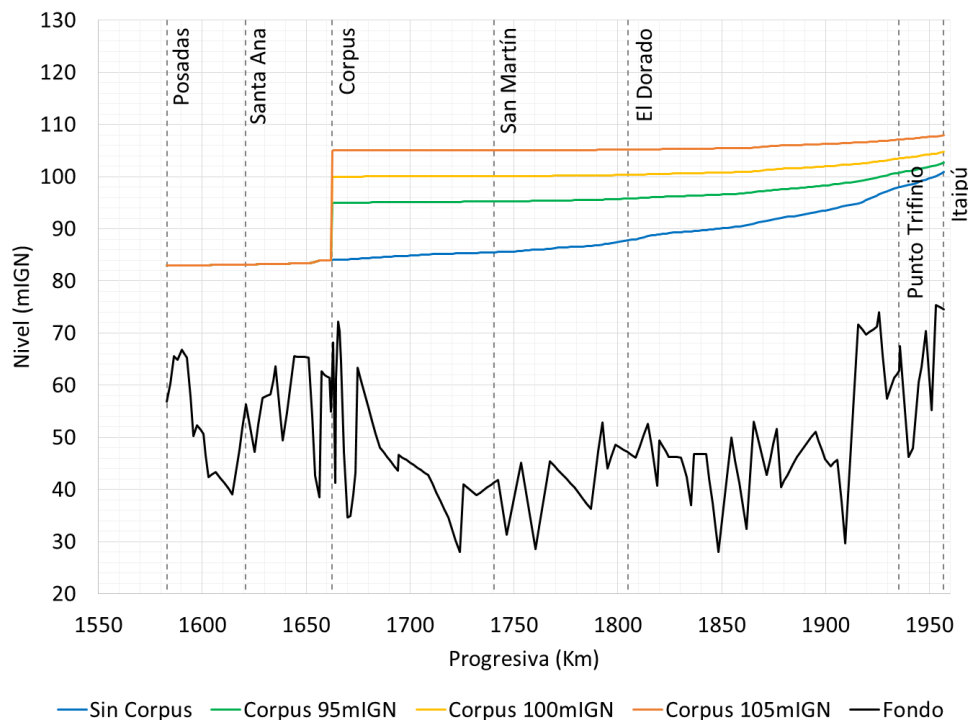
Para cada escenario se simuló un período de 33 años, almacenando resultados cada 4 horas (Cuarto Informe Parcial).

4.2 Condiciones hidrológicas normales

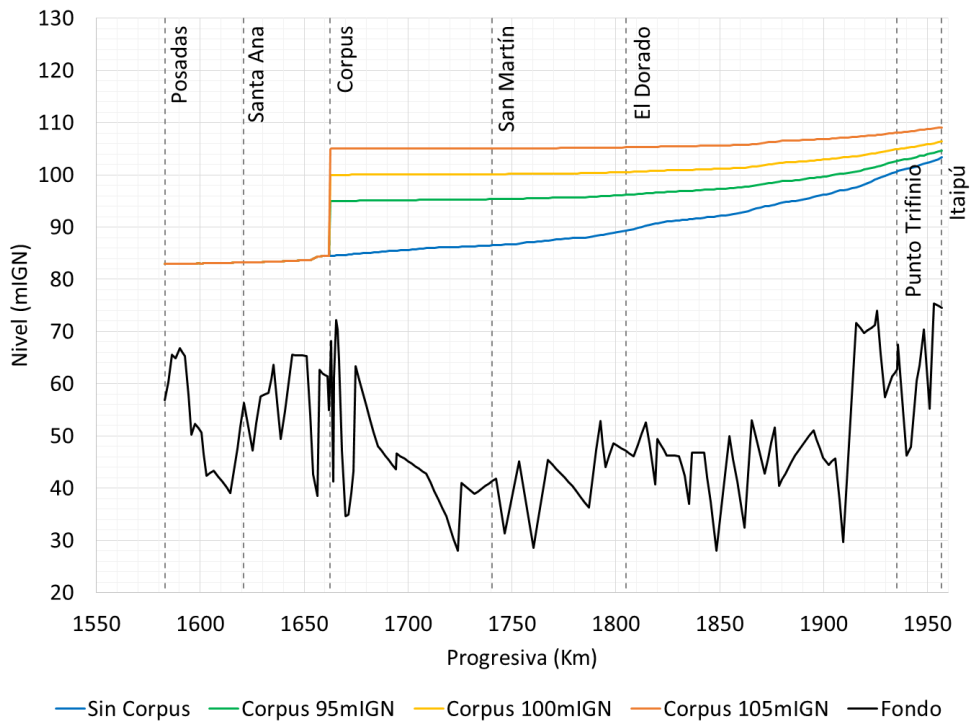
Se definieron escenarios correspondientes a condiciones hidrológicas normales a caudal constante asociados a distintas permanencias, entendidas estas como el porcentaje de tiempo durante el cual ese caudal es superado. Para ello se efectuaron estadísticas de caudal para las estaciones R11, Itaipú y Salto Cataratas sobre el período 1983-2014. Los caudales correspondientes a permanencias de 90%, 50% y 10% fueron los seleccionados para establecer escenarios.

Para cada escenario de permanencia, en el borde de aguas arriba de la rama Paraná Superior del modelo se impuso el caudal correspondiente a la estación Itaipú. Por su parte, en el borde de aguas arriba de la rama Iguazú del modelo se utilizó la diferencia entre los caudales asociados a las estaciones Itaipú y R11 para esa permanencia. Nótese que, de esta manera, los caudales utilizados para el río Iguazú resultan diferentes a los correspondientes a su propia estadística de permanencia (algo más del doble), pero así se conforman escenarios consistentes.

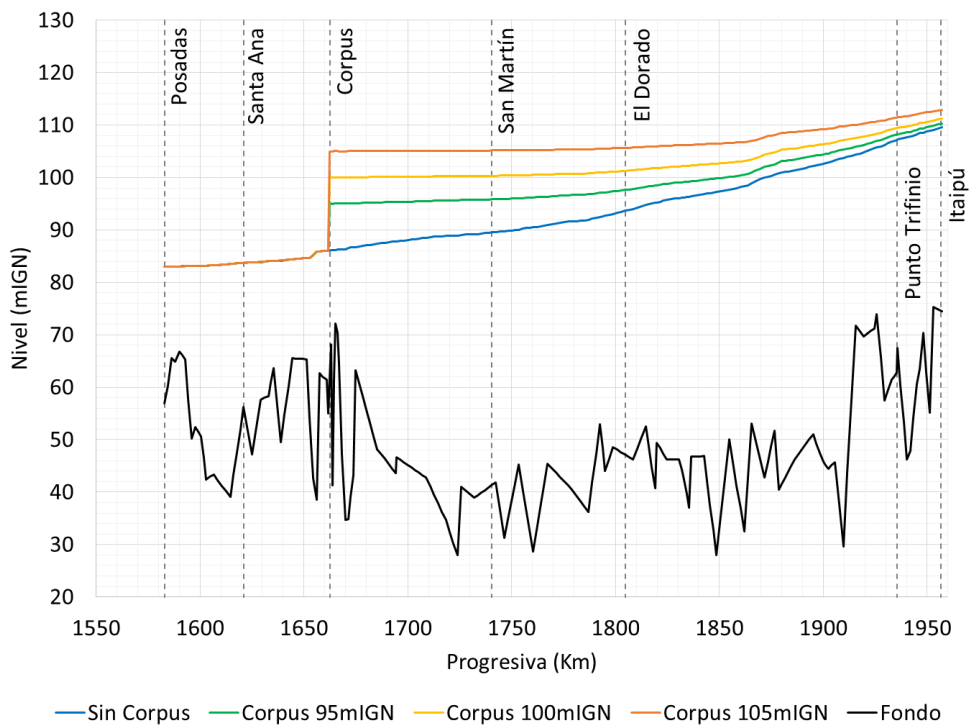
La Figura 4.1 muestra los perfiles longitudinales del río Paraná entre Posadas e Itaipú para los tres escenarios.



a) 90% de permanencia



b) 50% de permanencia



c) 10% de permanencia

Figura 4.1. Perfiles longitudinales del río Paraná para escenarios hidrológicos normales.

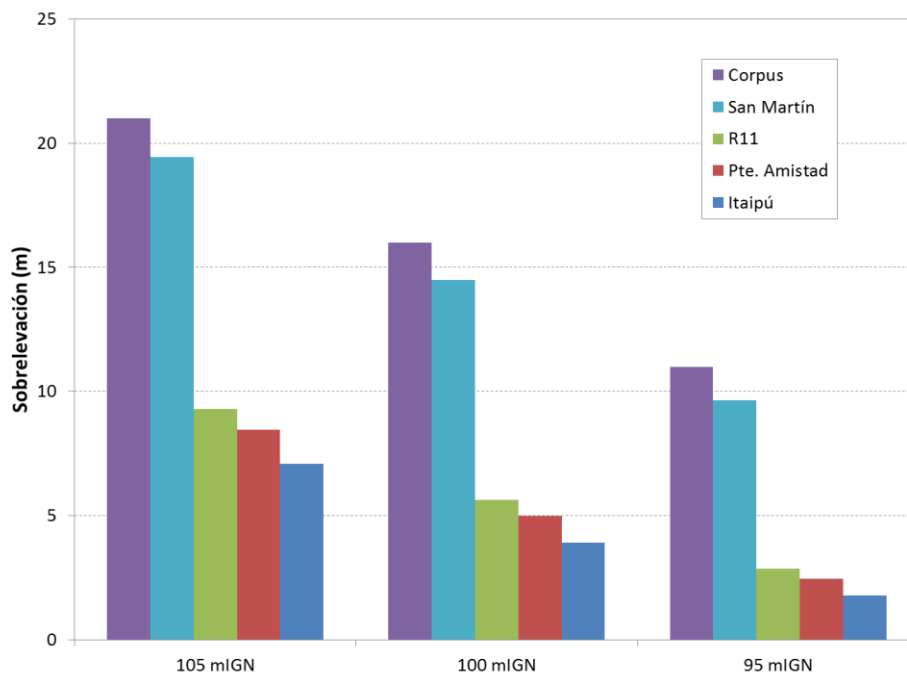
La Figura 4.2 muestra las sobrelevaciones (diferencia entre nivel con presa y sin presa). Se observa que:

- Para el 90% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 7 m en Itaipú y de algo más de 9 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN es de algo menos de 2 m en Itaipú y de algo menos de 3 m en el Punto Trifinio.
- Para el 50% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de algo menos de 6 m en Itaipú y de alrededor de 7,5 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN es de algo más de 1 m en Itaipú y de alrededor de 2 m en el Punto Trifinio.
- Para el 10% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de algo más de 3 m en Itaipú y de alrededor de 4,5 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN es de algo menos de 1 m en Itaipú y de algo más de 1 m en el Punto Trifinio.

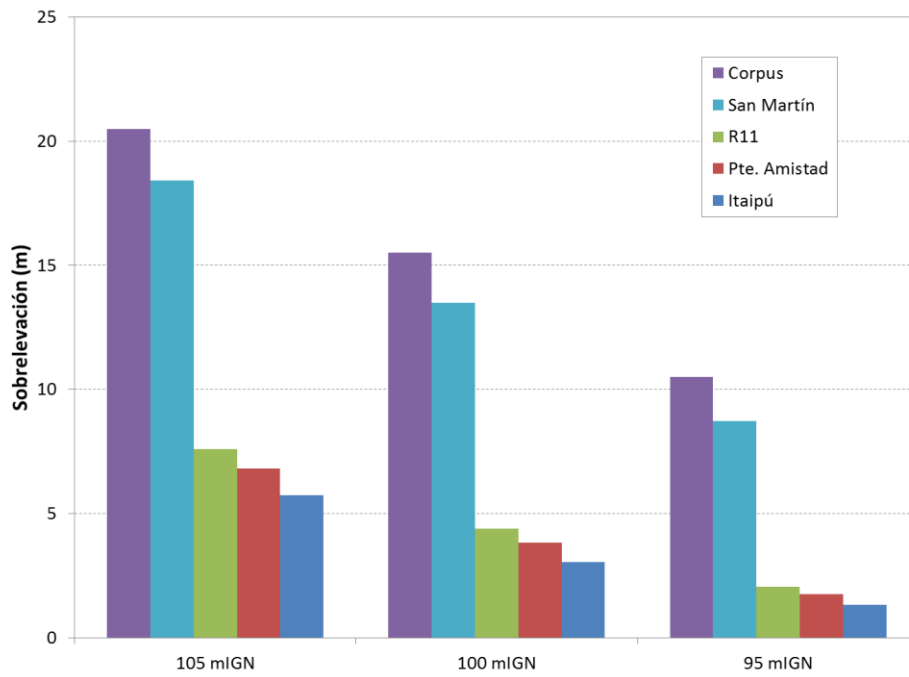
La Figura 4.3 presenta los perfiles longitudinales del río Iguazú entre el Punto Trifinio y las Cataratas para los tres escenarios.

La Figura 4.4 muestra las sobrelevaciones (diferencia entre nivel con presa y sin presa). Se observa que:

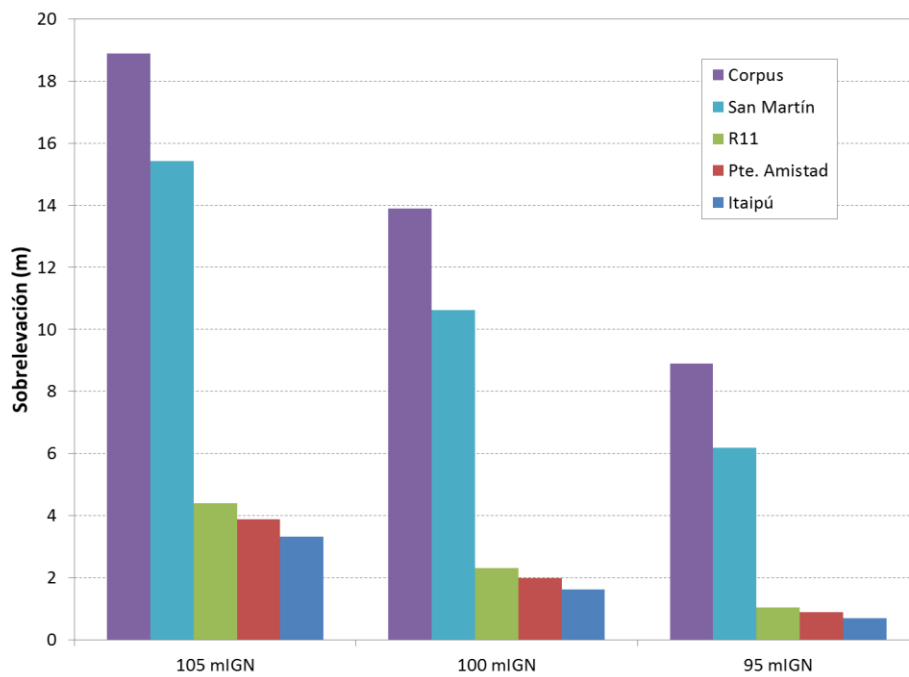
- Para el 90% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de algo más de 5 m, y con Corpus a 95 mIGN es de algo menos de 1 m.
- Para el 50% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 4,5 m, y con Corpus a 95 mIGN es de algo menos de 1 m.
- Para el 10% de permanencia, con Corpus a 105 mIGN es de algo menos de 3 m, y con Corpus a 95 mIGN es de alrededor de 0,6 m.



a) 90% de permanencia

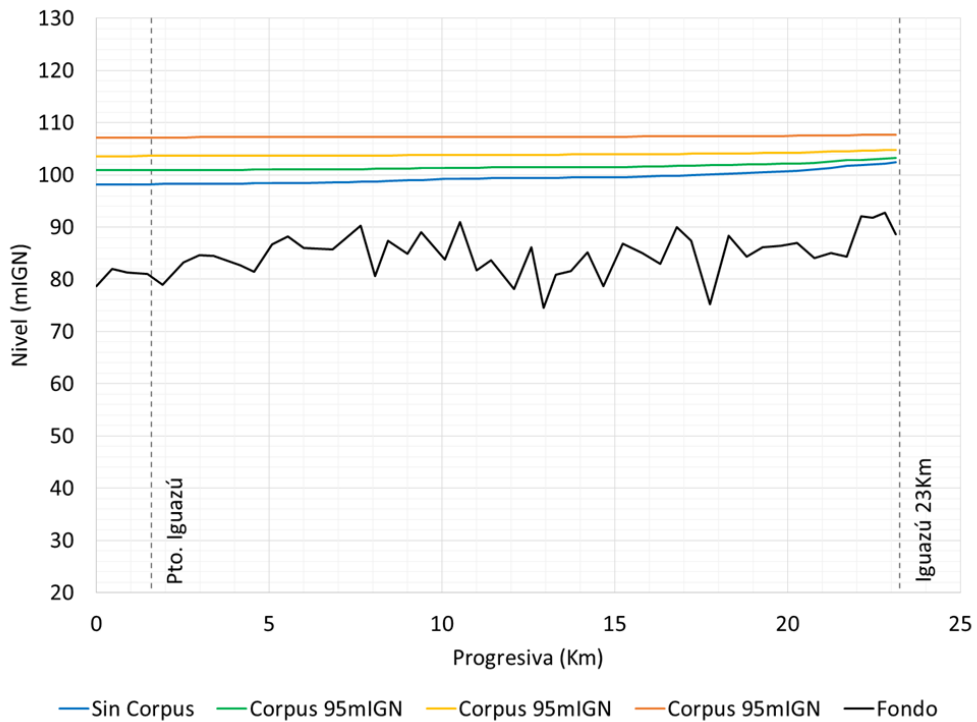


b) 50% de permanencia

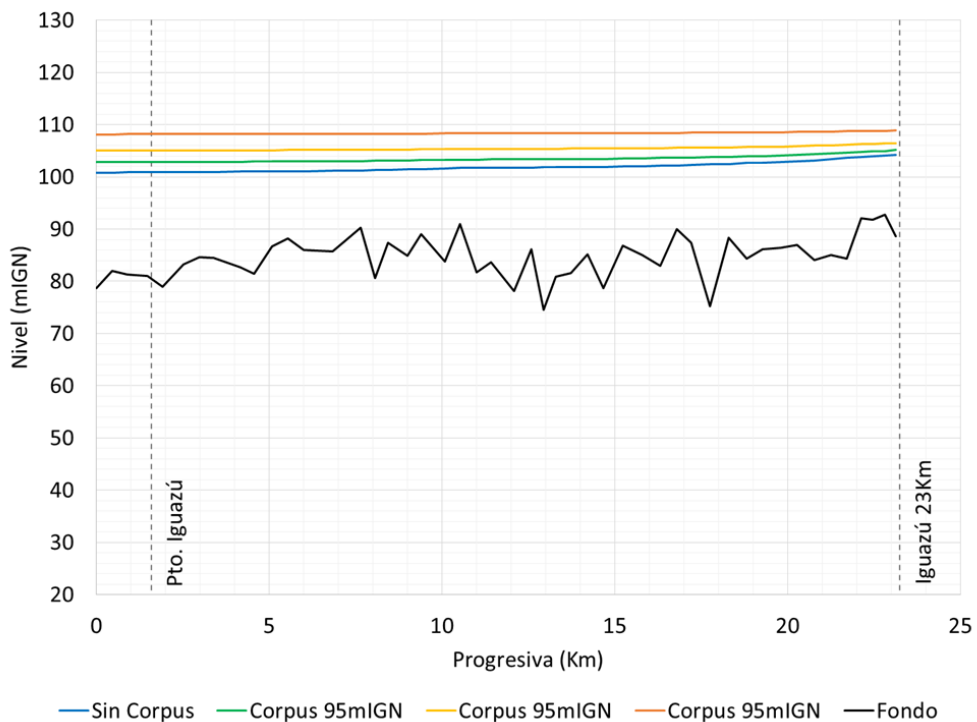


c) 10% de permanencia

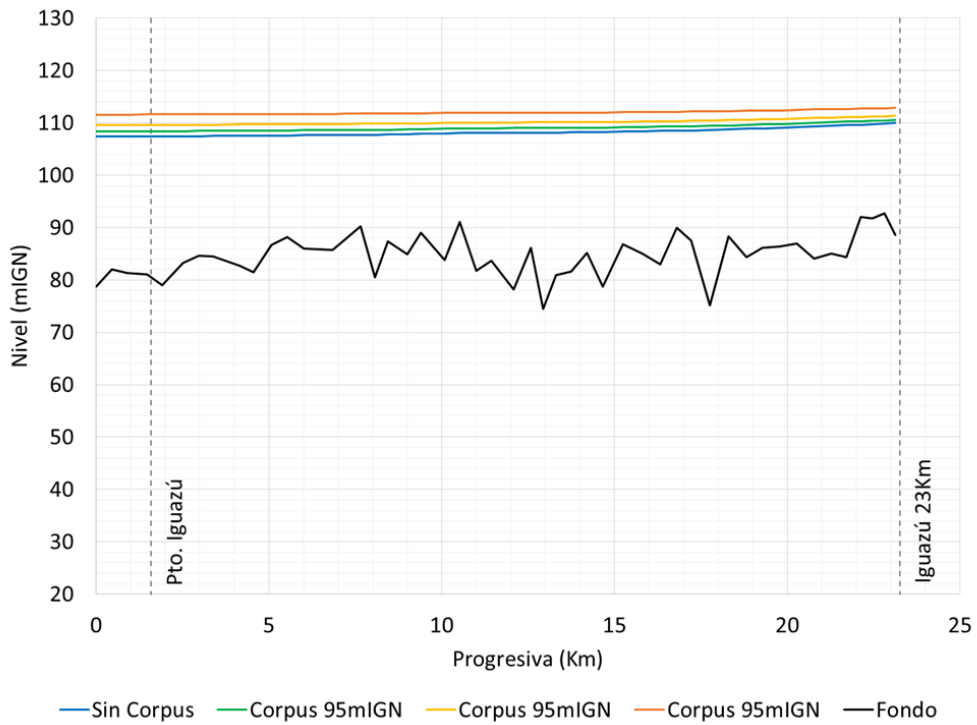
Figura 4.2. Sobrelevaciones con suavizado en estaciones del río Paraná para escenarios de condiciones normales y distintas cotas de Corpus.



a) 90% de permanencia

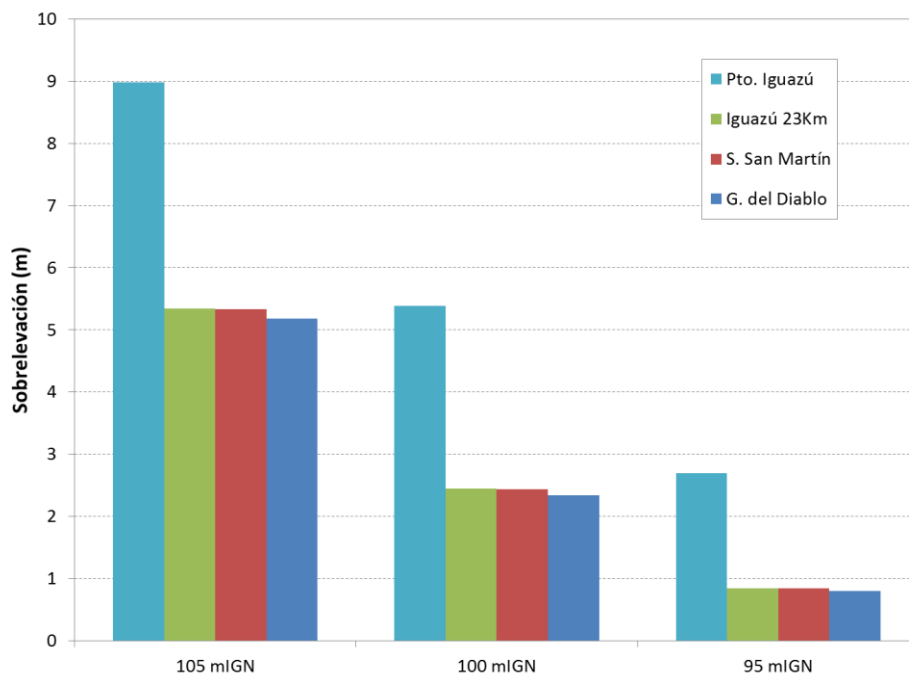


b) 50% de permanencia

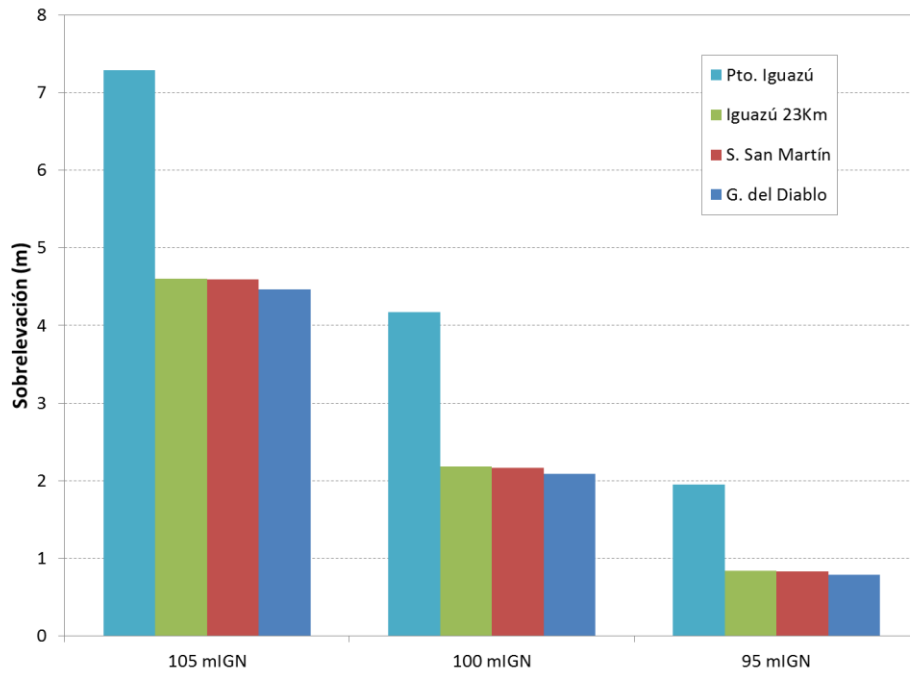


c) 10% de permanencia

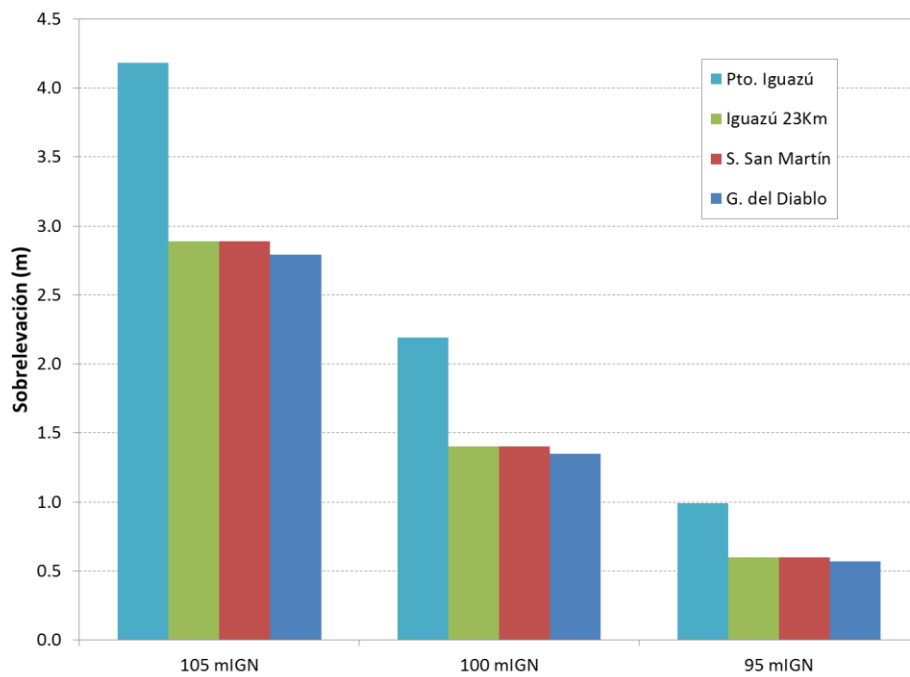
Figura 4.3. Perfiles longitudinales del río Iguazú para escenarios hidrológicos normales.



a) 90% de permanencia



b) 50% de permanencia



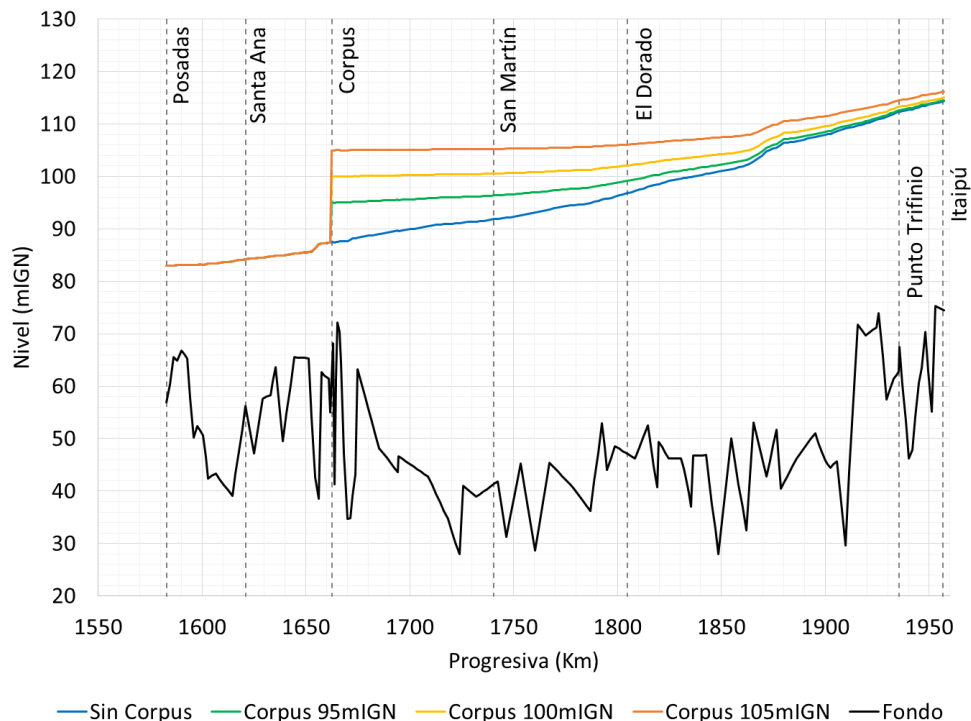
c) 10% de permanencia

Figura 4.4. Sobrelevaciones en estaciones del Río Paraná para escenarios de condiciones normales y distintas cotas de Corpus.

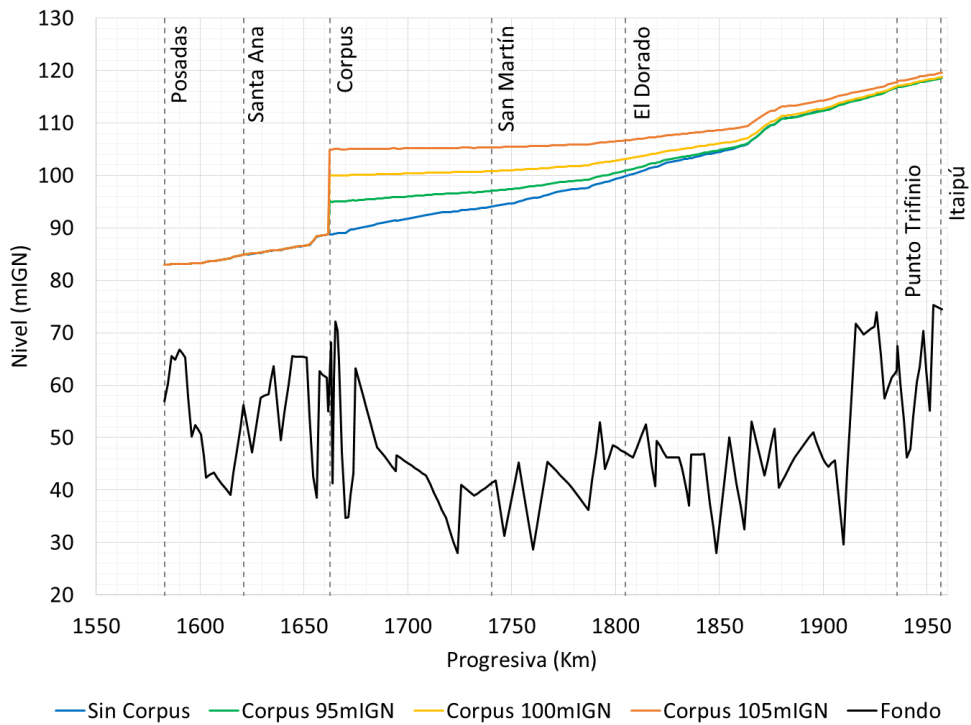
4.3 Crecidas extremas

Análogamente a lo efectuado para condiciones hidrológicas normales, se definieron escenarios correspondientes a crecidas extremas a caudal constante, asociados a distintas recurrencias. Se tomaron como base las estadísticas de caudal para las estaciones R11 e Itaipú, construidas sobre el período 1994-2011. Para cada recurrencia, en el borde de aguas arriba de la rama Paraná Superior del modelo se impuso el caudal correspondiente a la estación Itaipú. Por su parte, en el borde de aguas arriba de la rama Iguazú del modelo se utilizó la diferencia entre los caudales asociados a las estaciones Itaipú y R11 para esa recurrencia. Como en el caso anterior, de esta manera los caudales del Iguazú resultan diferentes a los correspondientes a crecidas de igual recurrencia de ese río, pero conforman escenarios consistentes. Estos valores son aproximadamente iguales a la mitad de los correspondientes a la misma recurrencia para ese río.

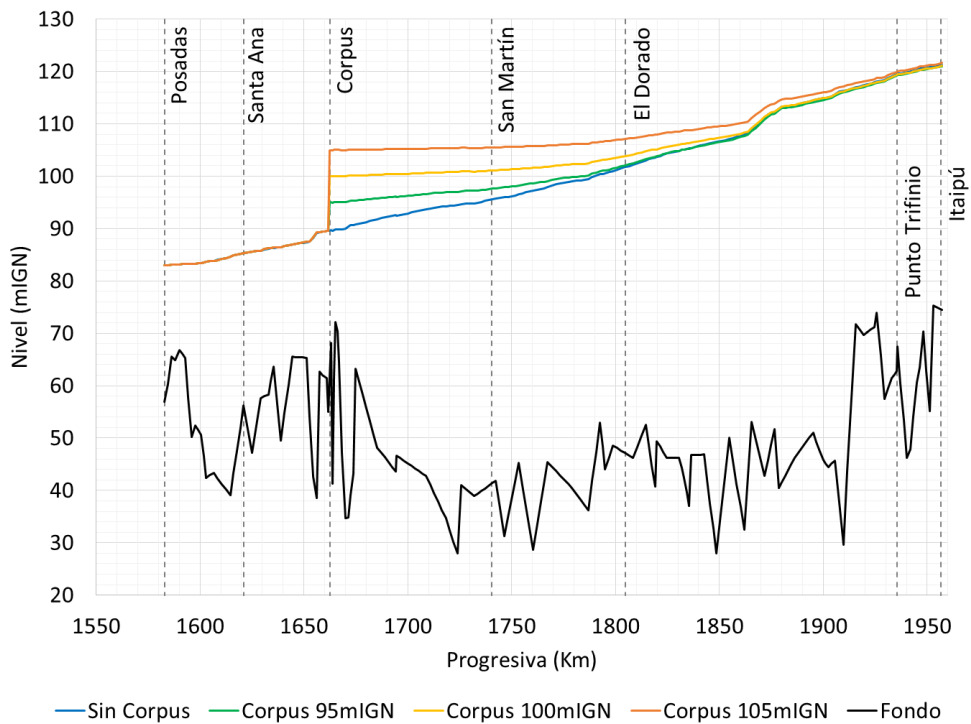
En la Figura 4.5 se presentan los perfiles longitudinales del río Paraná entre Posadas e Itaipú para los distintos escenarios. Se observa que para altas recurrencias los niveles con presa son inferiores a los naturales en el tramo superior de la zona modelada. Esto es por causa del suavizado, que genera tirantes normales inferiores, los cuales sólo tienden a alcanzarse para grandes caudales, ya que para los inferiores predomina el efecto de remanso. Pero hay que tener en cuenta que esto se verificaría solo en la medida en que las crecidas no presentaran una duración extraordinaria, ya que en este último caso las formas de fondo evolucionarían hacia dimensiones mayores y generarían entonces una mayor resistencia, con el consecuente incremento del nivel de agua.



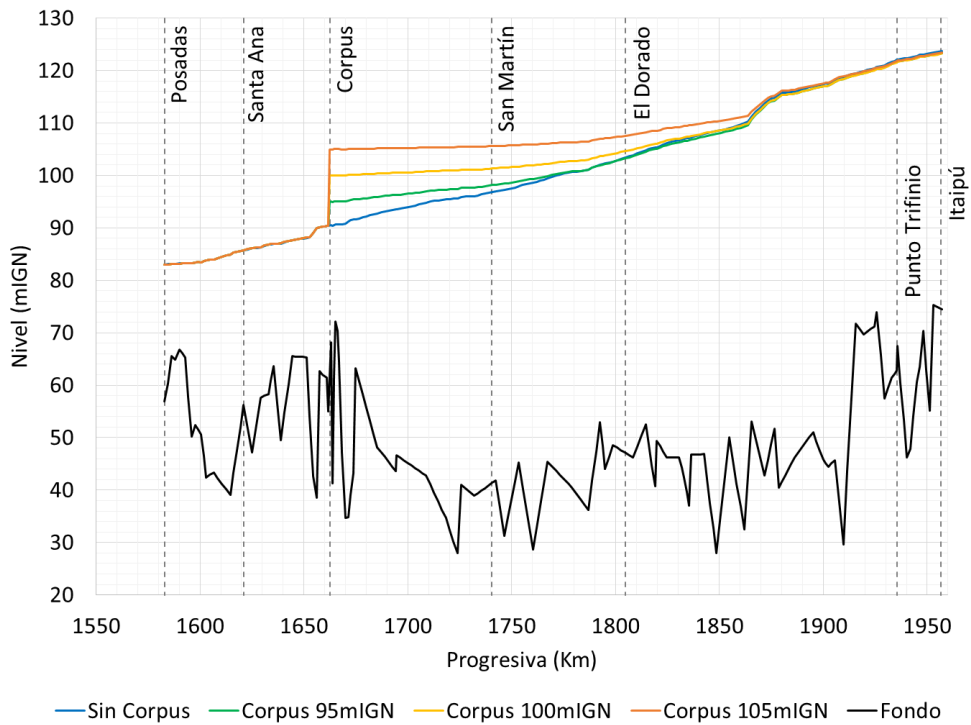
a) 2 años



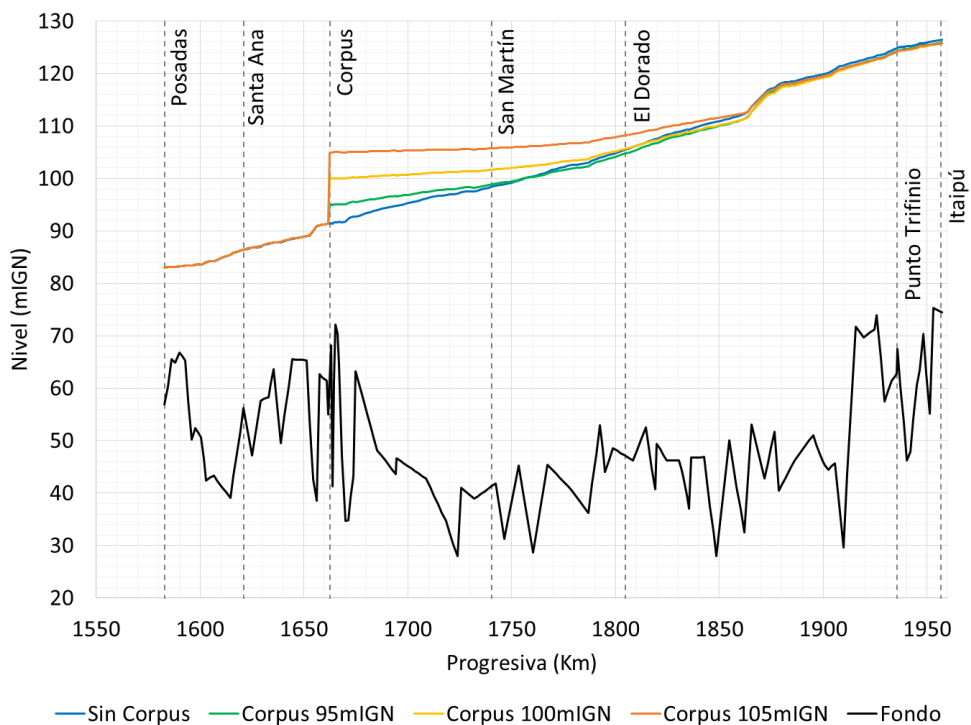
b) 5 años



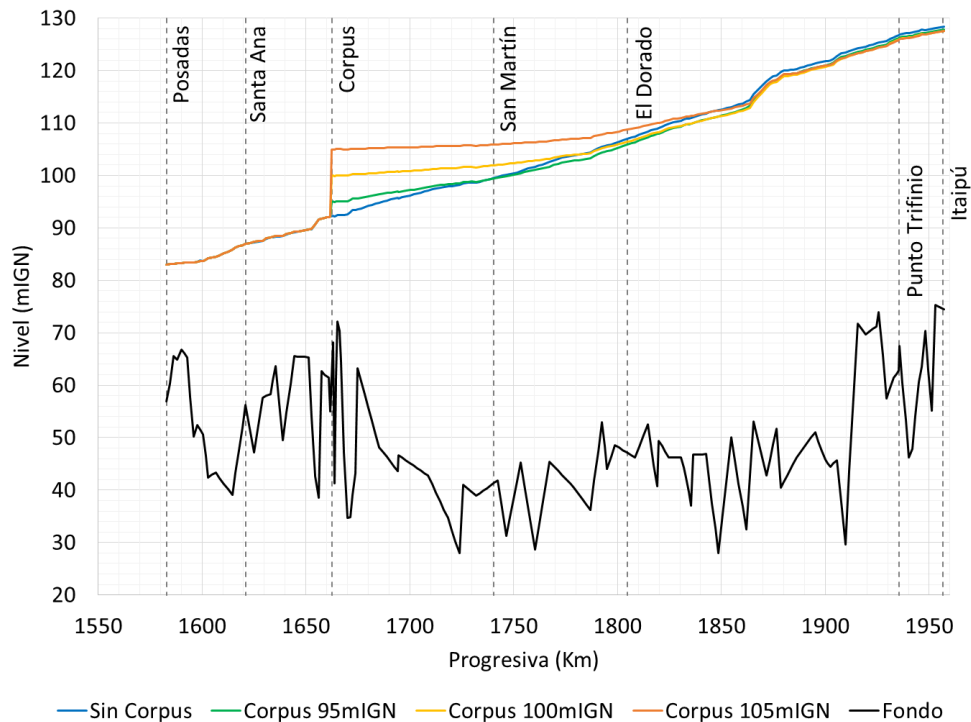
c) 10 años



d) 20 años



e) 50 años

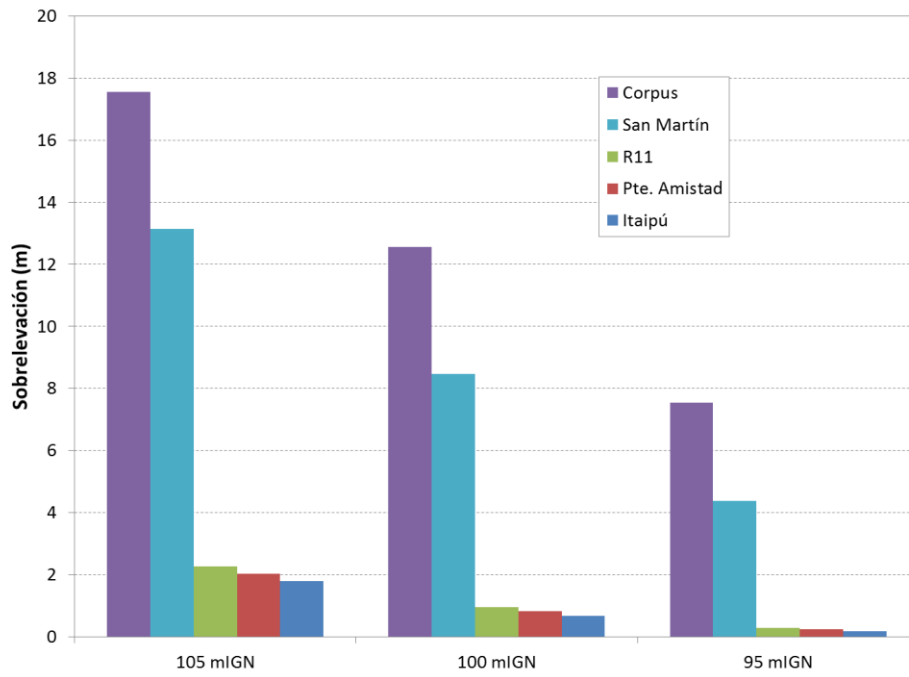


f) 100 años

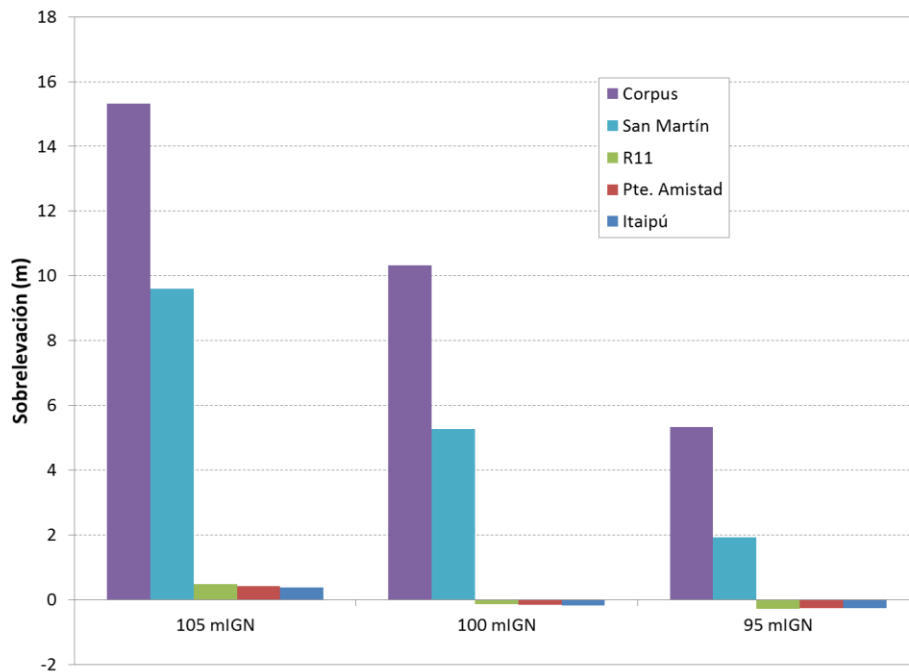
Figura 4.5. Perfiles longitudinales del río Paraná para escenarios de crecidas extremas y distintas cotas de Corpus.

La Figura 4.6 presenta las sobrelevaciones (diferencia entre nivel con presa y sin presa) para las distintas recurrencias. Se observa que:

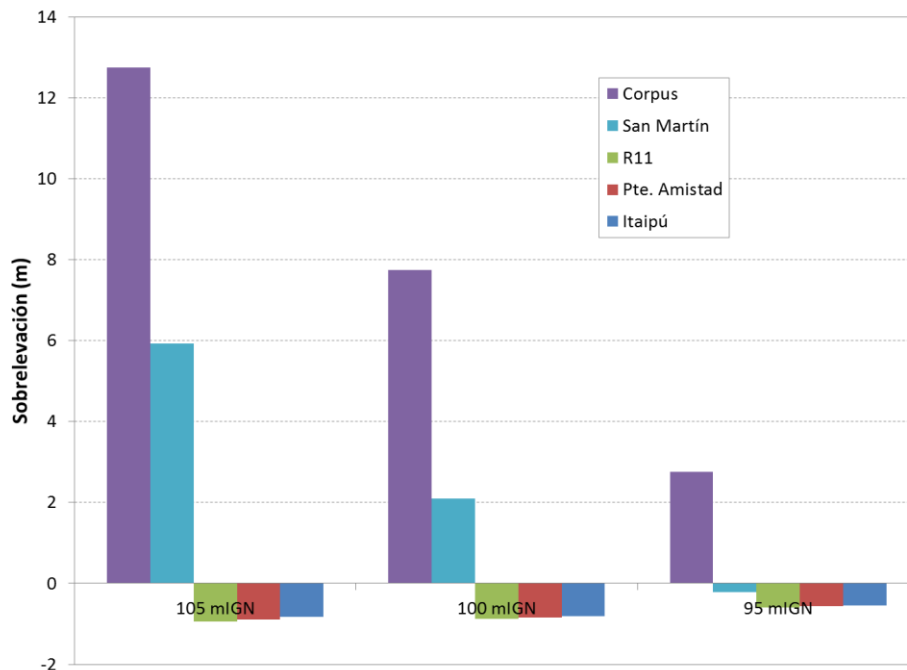
- Para 2 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 1,8 m en Itaipú y 2,3 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN es de alrededor de 0,2 m en Itaipú y 0,3 m en el Punto Trifinio.
- Para 10 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 0,4 m en Itaipú y 0,5 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN se producen depresiones en el Paraná Superior, de alrededor de 0,2 m en Itaipú y 0,15 m en el Punto Trifinio.
- Para 100 años de recurrencia se producen depresiones en el Paraná Superior; con Corpus a 105 mIGN estas son de alrededor de 0,8 m en Itaipú y de 0,95 m en el Punto Trifinio; con Corpus a 95 mIGN son de alrededor de 0,55 m en Itaipú y 0,6 m en el Punto Trifinio.



a) 2 años



b) 10 años



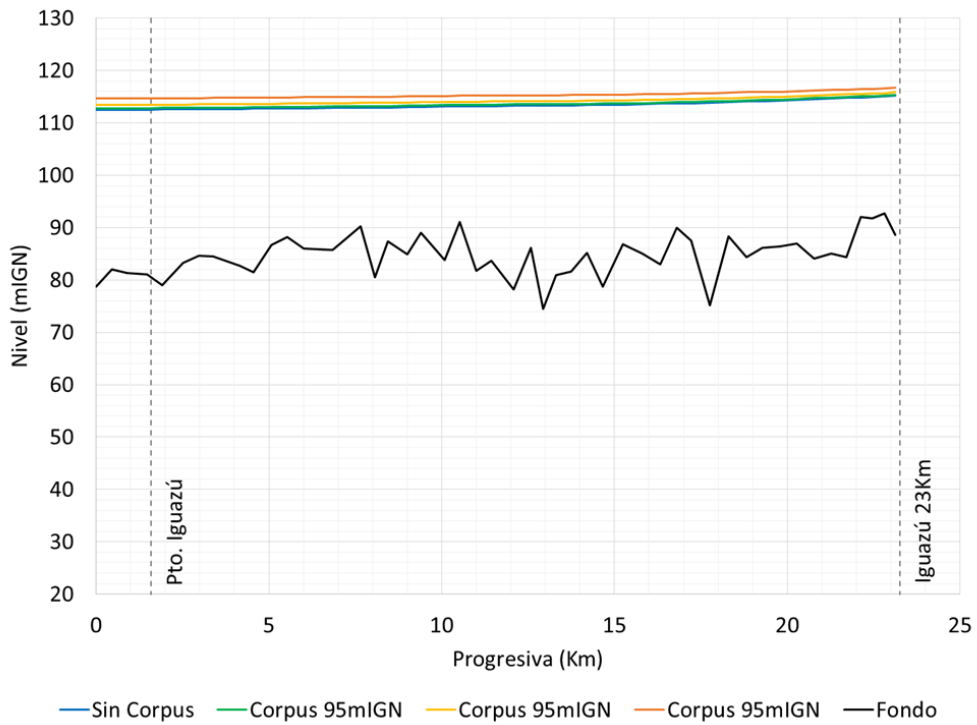
c) 100 años

Figura 4.6. Sobrelevaciones en estaciones del río Paraná para escenarios de crecidas extremas y distintas cotas de Corpus.

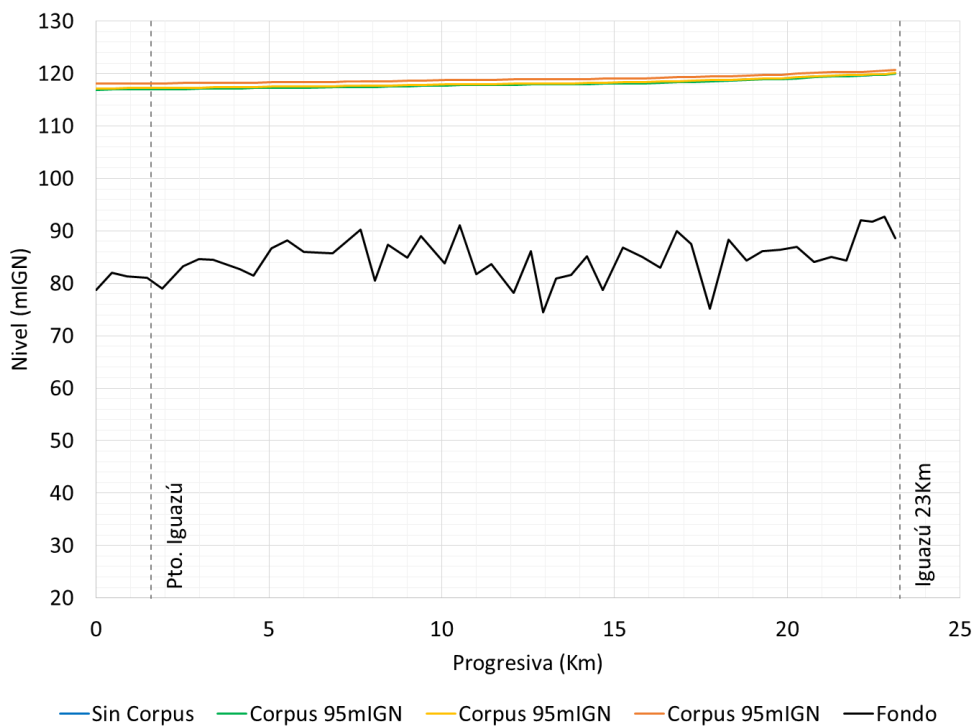
En la Figura 4.7 se muestran los perfiles longitudinales del río Iguazú entre el Punto Trifinio y las Cataratas para los distintos escenarios. Se observa que, como en el caso del río Paraná, para altas recurrencias los niveles con presa son inferiores a los naturales por efecto del suavizado.

En la Figura 4.8 se muestran las sobrelevaciones (diferencia entre nivel con presa y sin presa) para las distintas recurrencias. Se observa que:

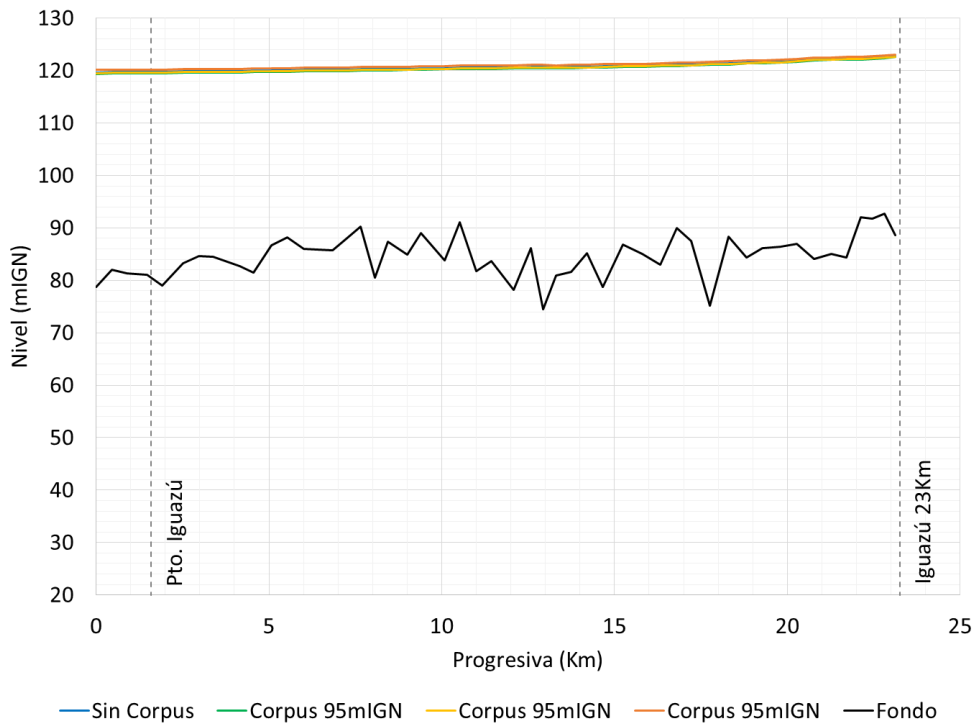
- Para 2 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 1,5 m, y con Corpus a 95 mIGN es de algo menos de 0,2 m.
- Para 10 años de recurrencia, con Corpus a 105 mIGN es de alrededor de 0,3 m, y con Corpus a 95 mIGN se producen depresiones de alrededor de 0,2 m.
- Para 100 años de recurrencia se producen depresiones; con Corpus a 105 mIGN estas son de alrededor de 0,65 m, y con Corpus a 95 mIGN de alrededor de 0,4 m.



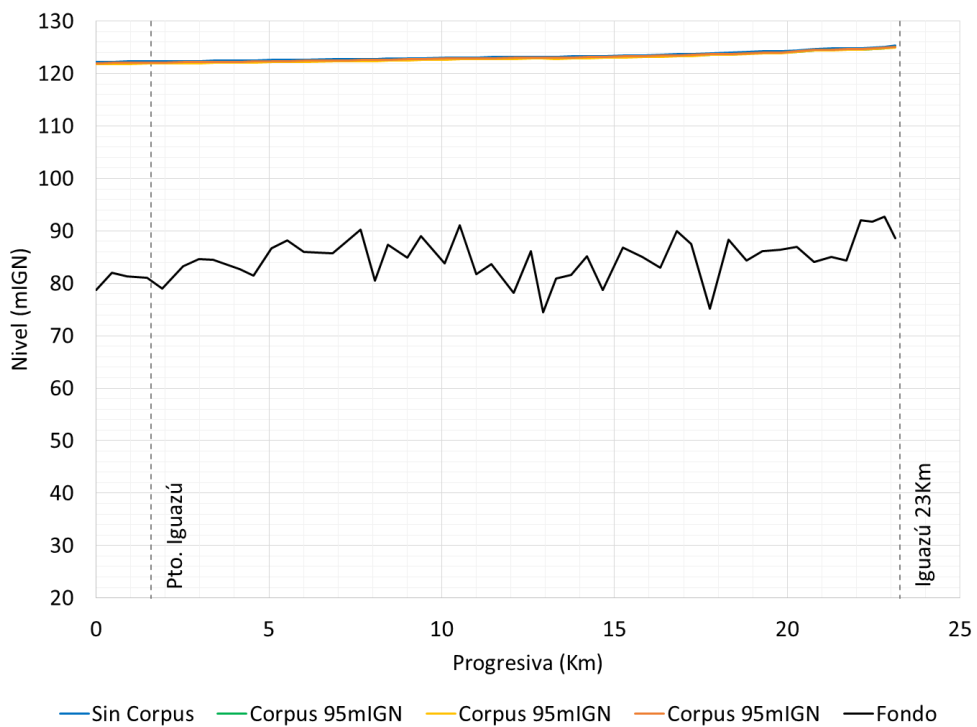
a) 2 años



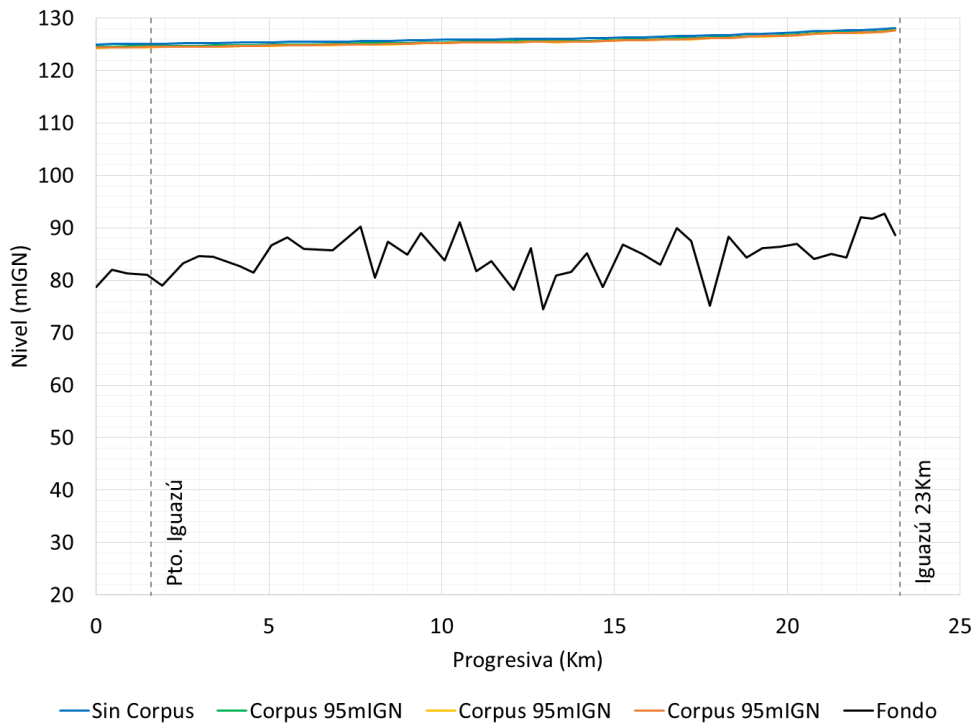
b) 5 años



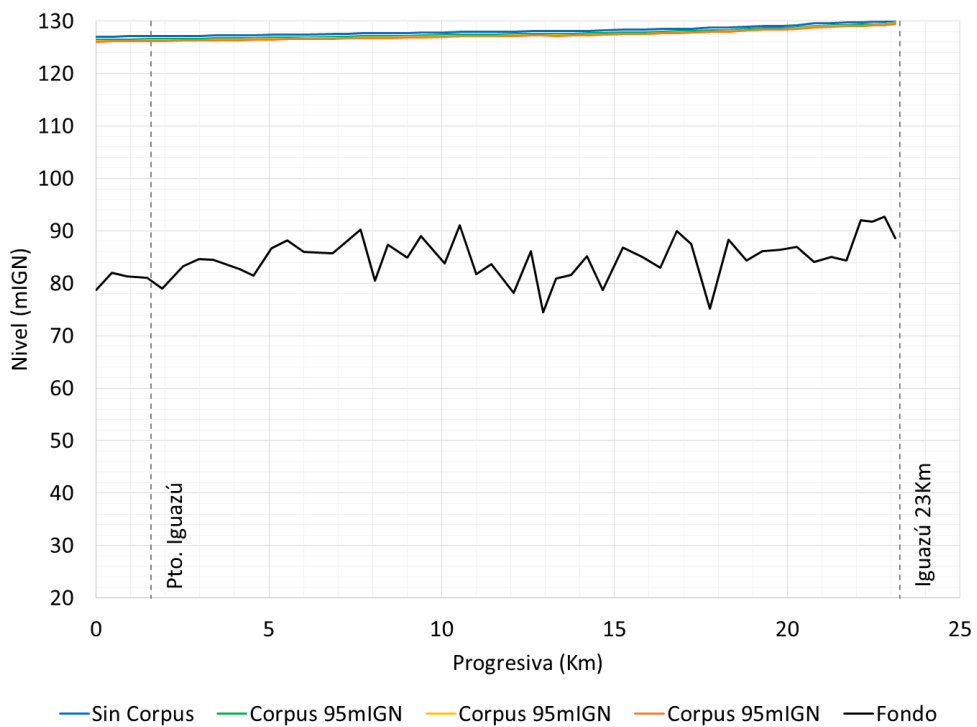
c) 10 años



d) 20 años

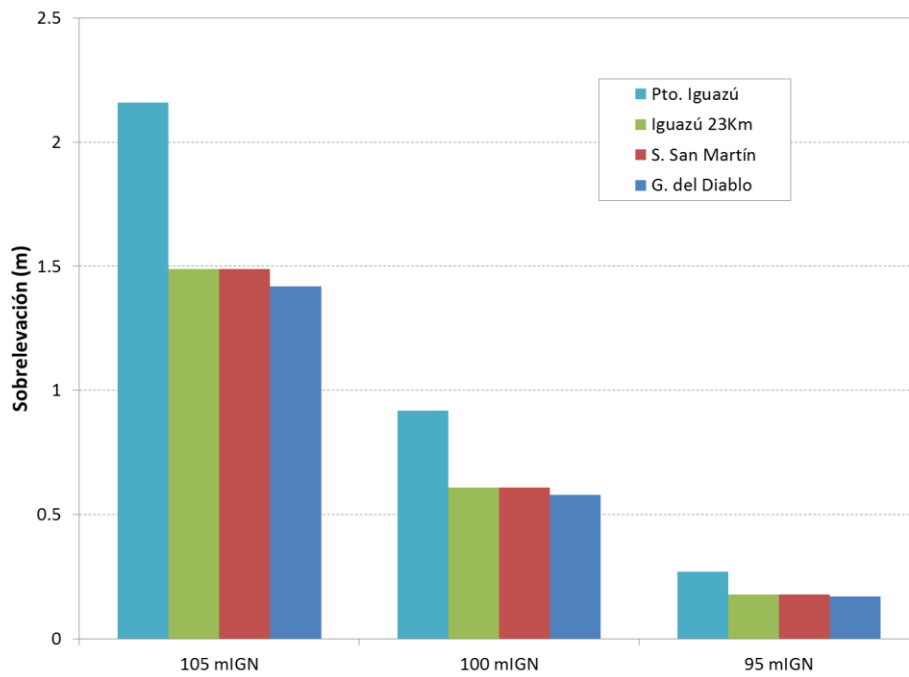


e) 50 años

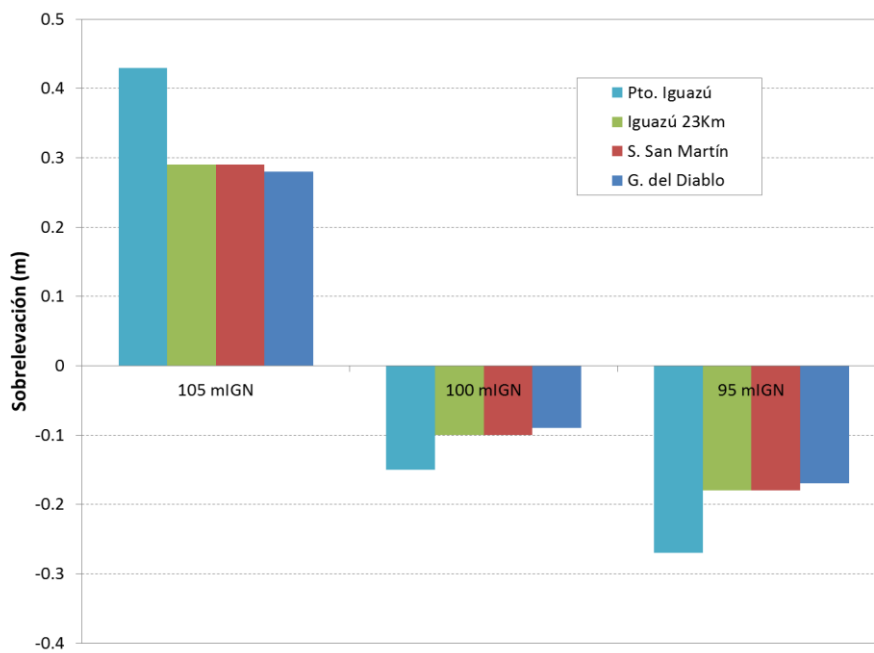


f) 100 años

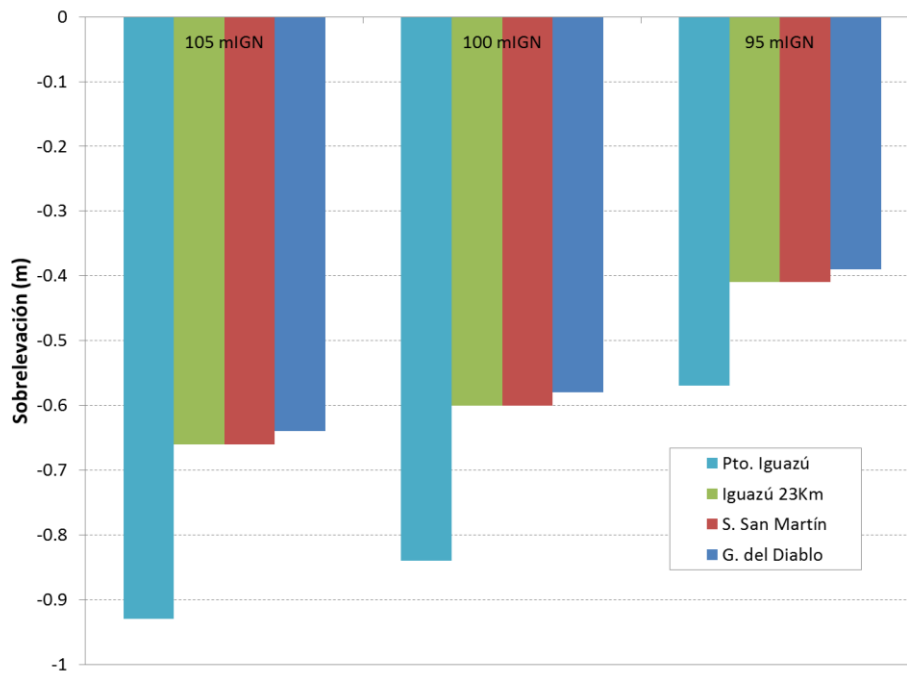
Figura 4.7. Perfiles longitudinales del río Iguazú para escenarios de crecidas extremas y distintas cotas de Corpus.



a) 2 años



b) 10 años

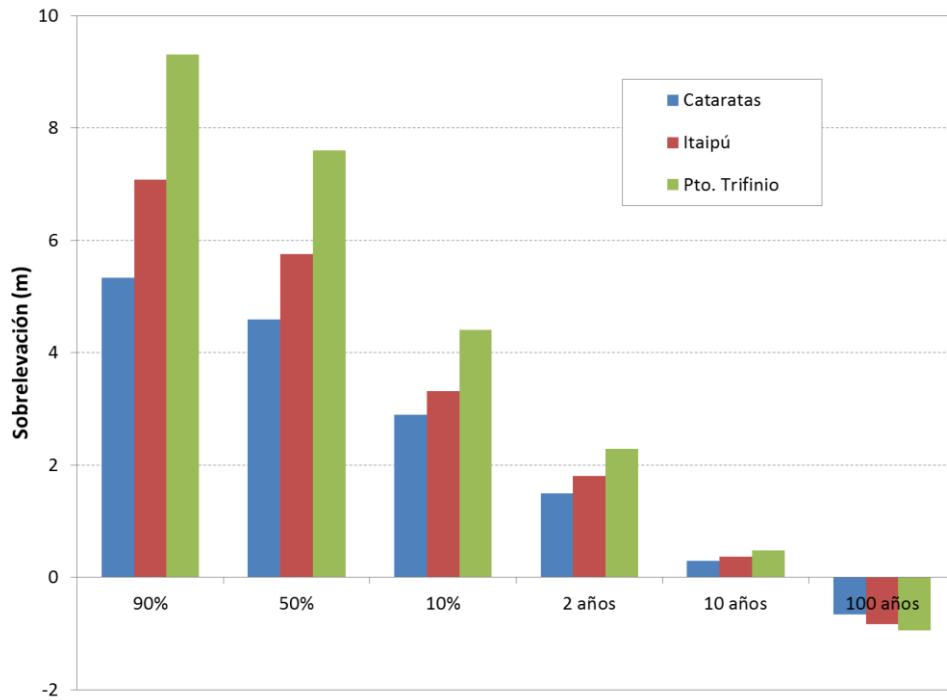


c) 100 años

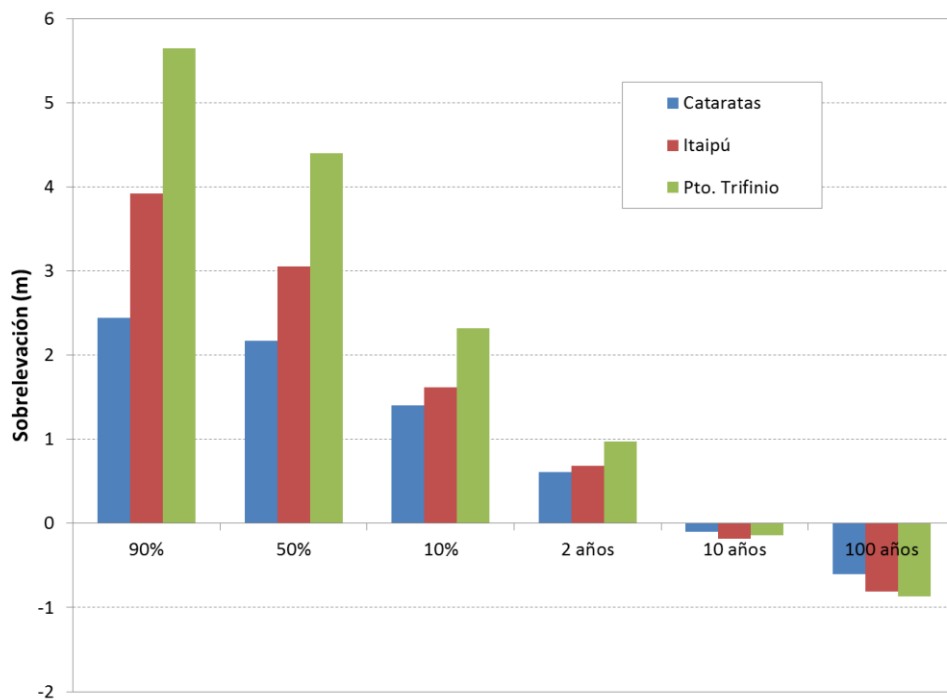
Figura 4.8. Sobrelevaciones en estaciones del río Iguazú para escenarios de crecidas extremas y distintas cotas de Corpus.

4.4 Síntesis de sobrelevaciones

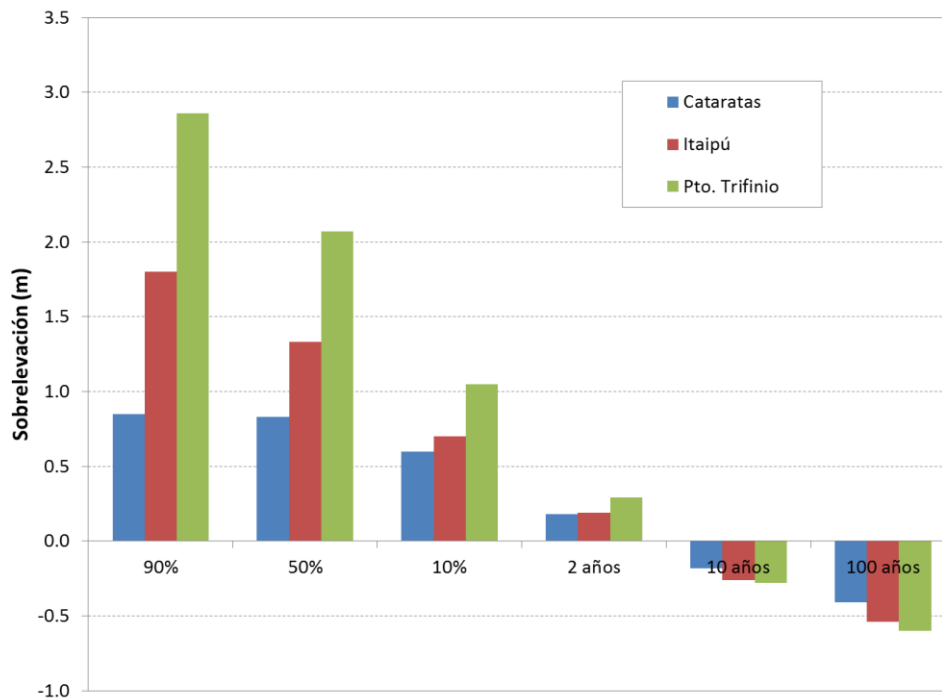
A modo de síntesis, en la Figura 4.9 se representan las sobrelevaciones en tres zonas críticas (Cataratas, Itaipú y Punto Trifinio) para escenarios hidrológicos de estiaje (90% de permanencia), medio (50% de permanencia), crecido (10% de permanencia), y de crecidas ordinarias (2 años de recurrencia) y extraordinarias (10 y 100 años de recurrencia), correspondientes a distintas cotas de embalse de Corpus. Obviamente, las sobrelevaciones disminuyen a medida que se intensifican las condiciones de escurrimiento, hasta convertirse en depresiones para crecidas extraordinarias (debido al efecto de suavizado del fondo).



a) 105 mIGN



b) 100 mIGN



c) 95 mIGN

Figura 4.9. Sobrelevaciones con suavizado para distintos escenarios hidrológicos y cotas de Corpus.

4.5 Mapas de inundación

Se construyeron los mapas de inundación del río Iguazú asociados a los escenarios de crecidas extremas (Cuarto Informe Parcial). A la escala del dominio de modelación no se observaron diferencias significativas en las zonas inundadas ni al variar las crecidas extremas para la misma condición de embalse de Corpus, ni al variar las condiciones de embalse de Corpus para la misma crecida extrema. En la Figura 4.10 se muestran los mapas correspondientes a sólo 4 casos en una escala ampliada, donde llegan a distinguirse algunas diferencias inmediatamente aguas arriba del cierre de Corpus. Esta relativa insensibilidad de la zona inundada a la variación de las condiciones hidrológicas y de embalse de Corpus se debe al carácter incisivo del cauce del río Iguazú.

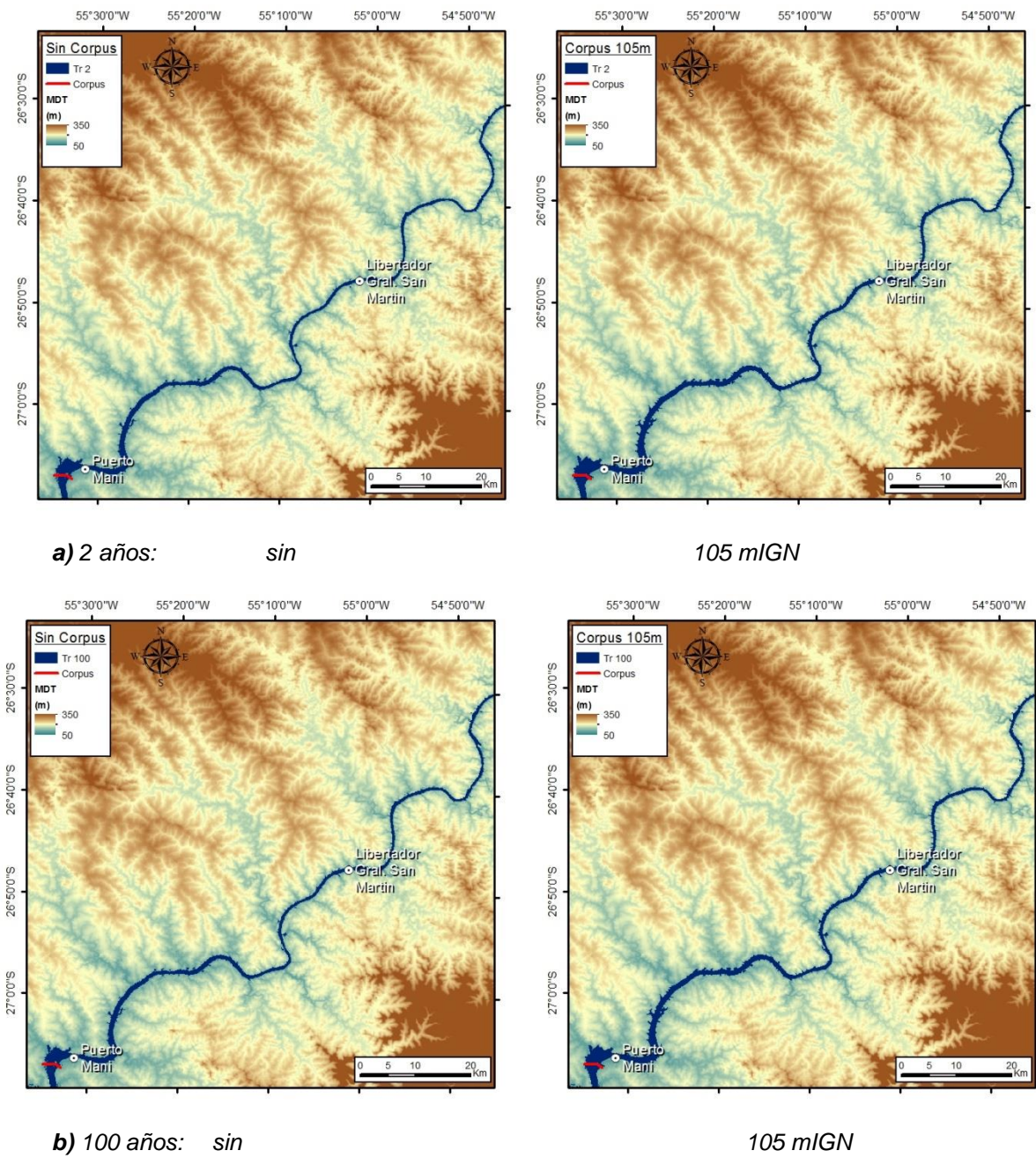


Figura 4.10. Mapas de inundación seleccionados para escenarios de crecidas extremas y distintas condiciones de embalse de Corpus.

5 ANÁLISIS DE LA OPERACIÓN DE ITAIPÚ

5.1 Planteo

La operación de la presa de Itaipú ejerce un efecto significativo sobre las condiciones hidrodinámicas del río Paraná aguas abajo de ese cierre. De hecho, esa operación está condicionada por el acuerdo tripartito entre Argentina, Paraguay y Brasil que obliga a limitar las tasas de variación del nivel en el Punto Trifinio.

No se conoce cuál es la política de operación de la central. Se efectuó un análisis para inferir algunas pautas a partir de los datos disponibles, esto es, erogación de caudales medio diarios de la presa de Itaipú (turbinados y erogados por vertedero), y caudales medios diarios en Guaira, que es la cola del embalse de Itaipú (Figura 5.1).

Los datos cubren un período extenso de tiempo (desde 1982 hasta el presente en Itaipú, y el período 2006-2015 en Guaira) pero con algunos vacíos, por lo que para el presente análisis se decidió utilizar el último período completo, que abarca los años 2013 y 2014 (Figura 5.2).

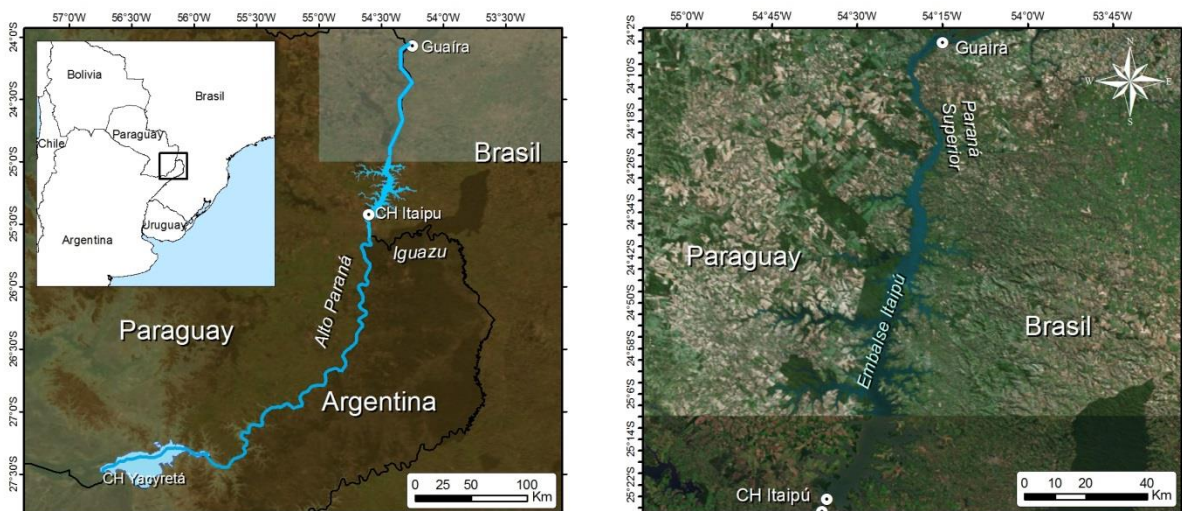


Figura 5.1. Ubicación de las estación Guaira e Itaipú.

5.2 Análisis de datos

Se analizó la diferencia entre el caudal entrante al embalse (Guaira) y saliente por la presa (Itaipú), la cual se muestra en la Figura 5.2. Se observa que esta oscila alrededor del cero. Sin embargo, hay una tendencia negativa, tal como surge de la diferencia acumulada de volumen que también se muestra en la figura, lo cual indica que existe un aporte lateral, el cual resulta de aproximadamente el 5% del caudal ingresado, valor relativamente pequeño pero no despreciable.

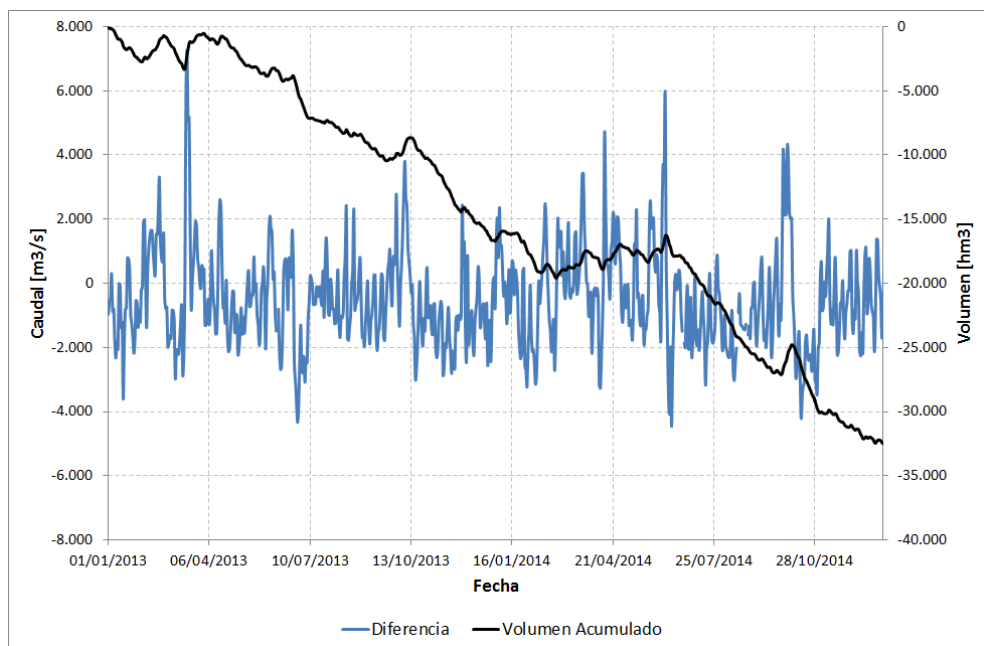


Figura 5.2. Diferencia entre los caudales entrante y saliente al embalse (azul) y diferencia de volumen acumulada (negro).

A continuación se procedió a efectuar un análisis espectral singular (SSA por sus siglas en inglés, *Singular Spectral Analysis*). Se observó que la primera componente (tendencia de la serie) explica para ambas series alrededor del 96,5% de la varianza, mientras que el resto sólo explica menos del 0,5% cada una. La Figura 5.3 compara las series de caudal reconstruidas (utilizando las primeras 9 componentes) en Guaira e Itaipú. Se observa claramente la regulación que impone la operación de la presa, suavizando las oscilaciones.

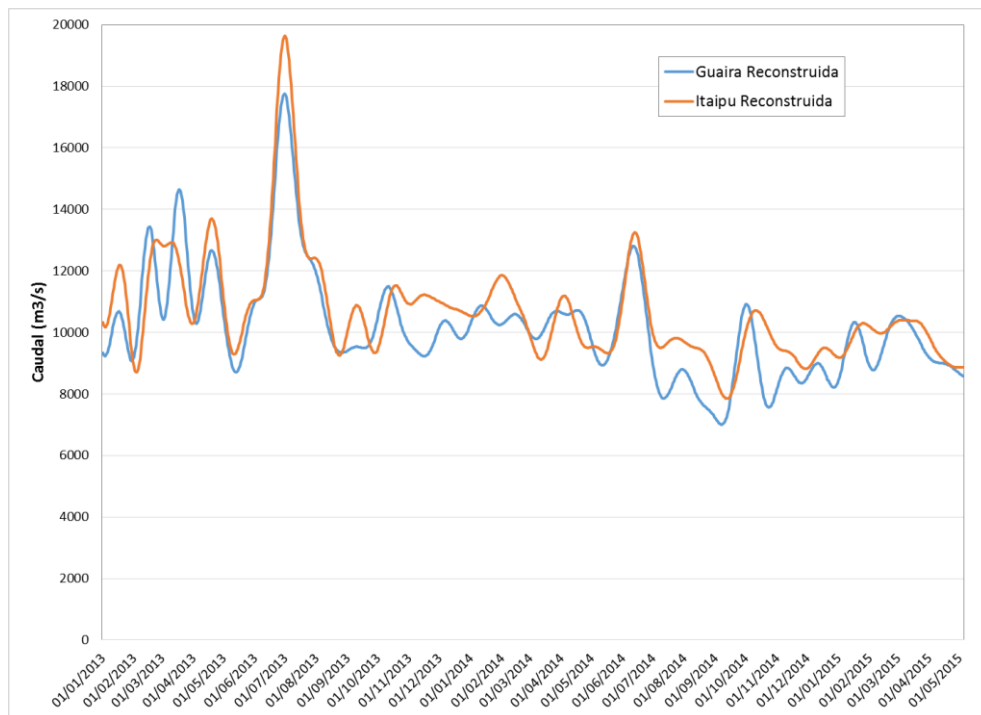


Figura 5.3. Series reconstruidas de los caudales en Guaira e Itaipú.

En la Figura 5.4 se muestra la diferencia entre los caudales reconstruidos entrante (Guairá) y saliente (Itaipú) del embalse, junto con los caudales entrantes como referencia. Valores negativos de esa diferencia significan descargas (turbinado y eventualmente vertido) más altas que ingresos (es decir, tendencia al vaciado del embalse), y viceversa. No se distingue estacionalidad en la diferencia de caudales, aunque (con alta incertidumbre debido a la corta extensión temporal de la serie) se puede observar que las tendencias más fuertes de vaciado (valores pico negativos de la diferencia) se darían en febrero/marzo, julio/agosto y octubre/noviembre. Por otro lado, tampoco se distingue una correlación significativa entre ambas señales. Sólo podría apuntarse que la tendencia de vaciado que se observa en julio de 2013 tiene que estar relacionada, al menos parcialmente, con la gran crecida que tuvo lugar en ese momento.

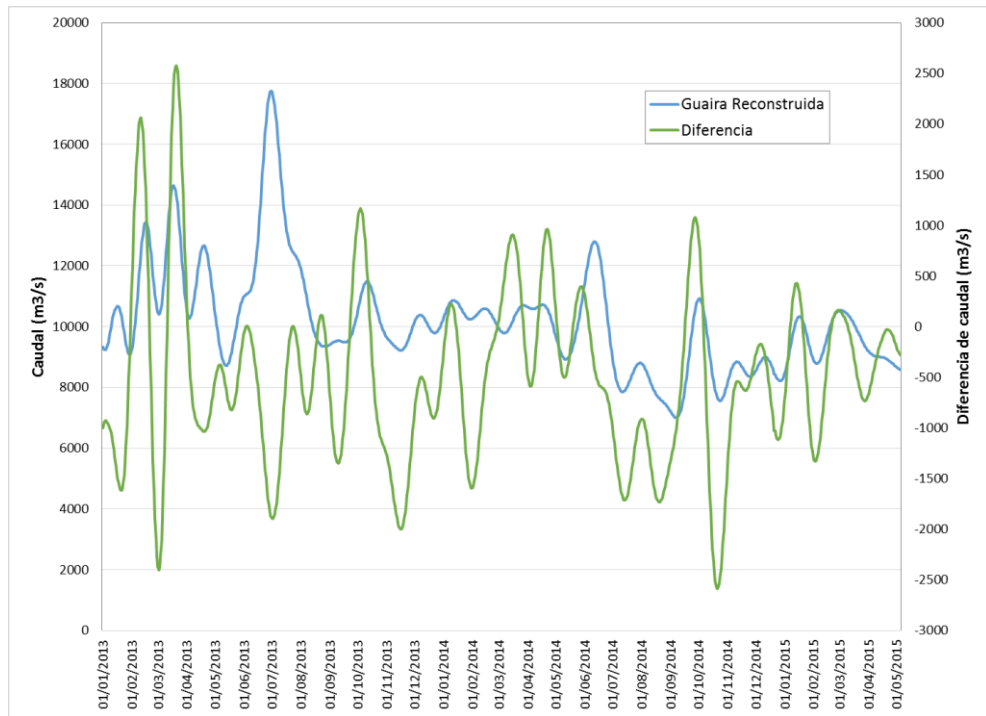


Figura 5.4. Serie de diferencia de caudales reconstruidos entrante y saliente.

6 CONCLUSIONES

Las siguientes son las principales conclusiones del estudio:

- Se ha implementado, calibrado y verificado un modelo hidrodinámico que incluye el Alto Paraná, desde el embalse de Yacyretá, el Paraná Superior, hasta el pie de la presa de Corpus, y el río Iguazú, hasta el pie de las Cataratas.
- La modelación ha indicado que se produjo una suavización efectiva del cauce al pasar de la etapa previa al llenado de Yacyretá a la del embalse a cota definitiva. Para el tramo entre las estaciones Ita Cuá y San Martín el cambio de régimen hidrodinámico por la presencia de la presa (mayores tirantes y menores velocidades) produjo la suavización efectiva del cauce a través de la disminución de la altura de las formas de fondo. No se distinguió cambio de rugosidad en el tramo San Martín-El Dorado. La suavización del tramo El Dorado-Itaipú también se supone asociada a la disminución de las alturas de las formas de fondo, pero esto debería estar asociado a la operación de la presa de Itaipú, que impone un régimen diario en el que predominan durante la mayor parte del tiempo velocidades de corriente menores a las del antiguo régimen natural.
- La potencial construcción de la presa de Corpus produciría un cambio significativo en las condiciones hidrodinámicas de la zona de estudio. En particular, afectaría los niveles de agua en tres zonas críticas: el pie de las Cataratas del Iguazú, el pie de la presa de Itaipú, y el Punto Trifinio.
- Se introdujo en el análisis de los escenarios con la presa de Corpus construida el efecto de suavizado que produciría la existencia del embalse. De acuerdo al modelo se generarían las siguientes sobrelevaciones por efecto de Corpus:

En la zona de Cataratas:

Con Corpus a 105 mIGN serían de algo más de 5 m para el escenario de 90% de permanencia (estiaje), de algo menos de 3 m para el escenario de 10% de permanencia (río crecido), de alrededor de 1,8 m para el escenario de 2 años de recurrencia (crecida ordinaria) y de alrededor de -0,8 m (depresión) para el escenario de 100 años de recurrencia (crecida extraordinaria).

Con Corpus a 95 mIGN serían de algo menos de 1 m para el escenario de 90% de permanencia (estiaje), de alrededor de 0,6 m para el escenario de 10% de permanencia (río crecido), de alrededor de 0,2 m para el escenario de 2 años de recurrencia (crecida ordinaria) y de alrededor de -0,55 m (depresión) para el escenario de 100 años

de recurrencia (crecida extraordinaria).

Al pie de Itaipú:

Con Corpus a 105 mIGN serían de alrededor de 7 m para el escenario de 90% de permanencia (estiaje), de algo más de 3 m para el escenario de 10% de permanencia (río crecido), de alrededor de 1,8 m para el escenario de 2 años de recurrencia (crecida ordinaria) y de alrededor de -0,8 m (depresión) para el escenario de 100 años de recurrencia (crecida extraordinaria).

Con Corpus a 95 mIGN serían de algo menos de 2 m para el escenario de 90% de permanencia (estiaje), de algo menos de 1 m en Itaipú para el escenario de 10% de permanencia (río crecido), de alrededor de 0,2 m para el escenario de 2 años de recurrencia (crecida ordinaria) y de alrededor de -0,55 m (depresión) para el escenario de 100 años de recurrencia (crecida extraordinaria).

- Dadas las incertidumbres debido a la ausencia de una base de datos limnimétricos en la zona de Cataratas, los resultados presentados para esa zona deberían considerarse como preliminares, sujetos a verificación. Además, dada la ausencia de datos batimétricos en el brazo del río Iguazú que se desarrolla entre Isla San Martín y Garganta del Diablo, los resultados correspondientes a esa zona deberían considerarse como estimaciones criteriosas que posiblemente constituyan sobrestimaciones en cuanto a las sobrelevaciones esperadas.
- Debido al carácter incisivo del cauce del río Iguazú, se observa una relativa insensibilidad de la zona inundada a la variación de las condiciones hidrológicas y de embalse de Corpus.
- La tendencia negativa de la diferencia entre el caudal entrante al embalse de Itaipú y el saliente por la presa indica que existe un aporte lateral de aproximadamente el 5% del caudal ingresado, valor relativamente pequeño pero no despreciable. La operación de la presa de Itaipú impone una suavización de las oscilaciones del caudal entrante. No se distingue estacionalidad en la diferencia entre los caudales entrante y saliente del embalse. Las tendencias más fuertes de vaciado se darían en febrero/marzo, julio/agosto y octubre/noviembre. No se distingue una correlación significativa entre la diferencia y el caudal entrante.