INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA

SUBSECRETARIA 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

Primer Informe Parcial



Proyecto LHA 357
Informe LHA 01-357-15
Ezeiza, Mayo de 2015

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. Nicolas D. BADANO

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

INFORME PRODUCIDO POR

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

Ing. Nicolas D. BADANO

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

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

Primer Informe Parcial

RESUMEN

Se describen, analizan y procesan los datos antecedentes. Por un lado esto incluye a la información hidrométrica, de la cual surge una caracterización hidrológica del sistema. Por otro lado incluye a la información topobatimétrica, de la cual surge el Modelo Digital de Elevación del terreno y del cauce. Se describe la implementación y calibración del modelo hidrodinámico preliminar.

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 HIDROMÉTRICA 6

2.1 Dominio de modelación 6

2.2 Datos hidrométricos 7

2.3 Curvas altura-caudal 9

2.4 Series de caudal simultáneas 12

2.4.1 Selección 12

2.4.2 Estadística descriptiva 12

2.4.3 Análisis de valores extremos 20

2.5 Series de caudal prolongadas 23

2.5.1 Selección 23

2.5.2 Estadística descriptiva 26

2.5.3 Análisis de valores extremos 29

3 INFORMACIÓN TOPOBATIMÉTRICA 34

3.1 Topografía 34

3.2 Batimetría 35

3.2.1 Río Paraná/Tramo Cierre Yacyretá – Posadas 35

3.2.2 Río Paraná/Tramo Posadas – Pindoí 37

3.2.3 Río Paraná/Tramo Pindoí – Punto Trifinio 38

3.2.4 Río Paraná/Tramo Punto Trifinio – Itaipú 40

3.2.5 Tramo Río Iguazú/Punto Trifinio – Cataratas 41

3.2.6 MDE del cauce 42

3.3 MDE General 42

4 MODELO HIDRODINÁMICO 44

4.1 Modelo preliminar 44

4.2 Código Numérico 44

4.3 Secciones transversales 44

4.3.1 Metodología de construcción 44

4.3.2 Tramo Itaipú – Punto Trifinio 45

4.3.3 Tramo Cataratas - Punto Trifinio 47

4.3.4 Tramo Punto Trifinio – Corpus 48

4.3.5 Tramo Corpus - Posadas 53

4.3.6 Tramo Embalse Yacyretá 55

4.4 Condiciones de borde y aportes laterales 57

4.5 Resistencia hidráulica 57

4.6 Calibración 57

4.6.1 Escenarios 57

4.6.2 Estaciones de comparación 58

4.6.3 Indicadores de bondad de ajuste 59

4.6.4 Escenario previo al llenado 60

4.6.5 Escenario a cota definitiva 71

5 CONCLUSIONES **78**

REFERENCIAS **79**

1 INTRODUCCIÓN

La construcción de la presa de Corpus generará un cambio en las condiciones de flujo del río Paraná, que influenciará tanto aguas arriba, a través de efectos de remanso, como aguas abajo, debido al control de la descarga.

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 debidamente calibrado, capaz de dar respuesta a los diversos interrogantes que plantea la construcción de la presa en cuanto a la afectación del régimen hidrológico, incluyendo la influencia de distintas alternativas de obra.

El estudio incluirá 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 preliminar prexistente en el INA, 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.

F. Aplicación del modelo hidrodinámico definitivo.

En este Primer Informe Parcial se describen los datos antecedentes y el modelo hidrodinámico preliminar, provenientes del Estudio PAE. La organización del informe es como sigue:

- En el capítulo 2 se presenta y analiza la información hidrométrica.
- En el capítulo 3 se describe la información topobatimétrica y la construcción del Modelo Digital de Elevación (MDE).
- En el capítulo 4 se describe la implementación y calibración del modelo hidrodinámico preliminar.
- En el capítulo 5 se vierten las conclusiones de esta etapa del estudio.

2 INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA

2.1 Dominio de modelación

El modelo a construir se basará en el modelo numérico hidrodinámico unidimensional implementado para la EBY (Entidad Binacional Yacyretá) durante el Estudio PAE. Este modelo, denominado *MOAGAR-2*, consta de tres ramas (Figura 2.1):

- Rama Paraná Superior, desde la presa de Itaipú hasta el Punto Trifinio.
- Rama Iguazú, desde el pie de las Cataratas hasta el Punto Trifinio.
- Rama Alto Paraná, desde el Punto Trifinio hasta el cierre de la presa de Yacyretá.



Figura 2.1. *Ramas del modelo unidimensional*

2.2 Datos hidrométricos

Durante el Estudio PAE se armó una base de datos hidrométricos, consistente en series de aforos, y series temporales de niveles de agua y caudales medios diarios, de la cual las 18 estaciones de medición de Argentina, Brasil y Paraguay pertinentes al presente proyecto se muestran en la Figura 2.2.

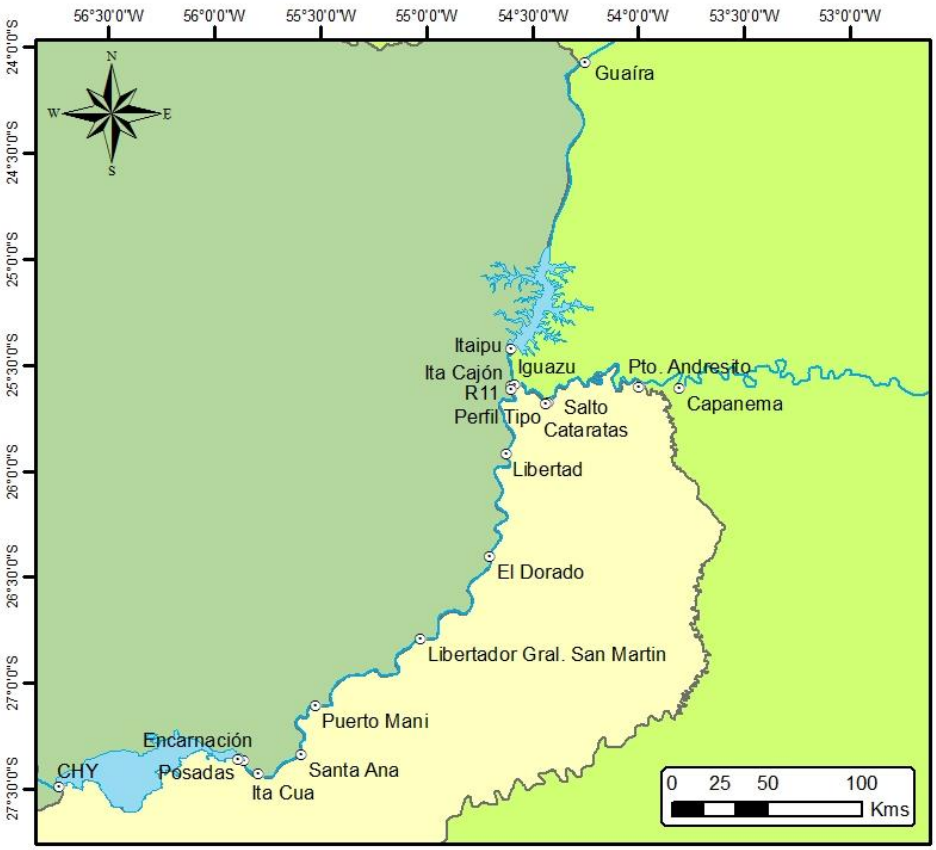


Figura 2.2. *Ubicación de las estaciones con información hidrométrica.*

El detalle de la información de cada una de las estaciones referenciadas se presenta en las Tablas 2.1 y 2.2. En la primera se detallan las ubicaciones de cada estación y la fuente de los datos asociados. En la segunda se indican las ventanas temporales disponibles para las tres variables elegidas.

Tabla 2.1. *Ubicación y fuente de las estaciones hidrométricas.*

#	Río	Estación	Fuente	Latitud	Longitud
1	Iguazú	Capanema	Red ITAIPU – Brasil	25º 36' 25" S	53º 47' 59" W
2	Iguazú	Perfil Tipo	SSRH – Argentina	25º 40' 36" S	54º 25' 17" W
3	Iguazú	Salto Cataratas	Red ITAIPU – Brasil	25º 40' 48" S	54º 25' 48" W
4	Iguazú	Puerto Andresito	SSRH – Argentina	25º 36' 16" S	53º 59' 30" W
5	Iguazú	Iguazú	SSRH – Argentina	25º 35' 36" S	54º 34' 47" W
6	Paraná	Guaíra	ANA - Brasil	24º 04’ 10" S	54º 14’ 56” W
7	Paraná	Itaipu	Red ITAIPU – Brasil	25º 25' 19" S	54º 35' 46" W
8	Paraná	R11	Red ITAIPU – Brasil	25º 36' 53" S	54º 35' 54" W
9	Paraná	Ita Cajon	SSRH – Argentina	25º 36' 15" S	54º 35' 34" W
10	Paraná	Libertad	PNA – Argentina	25º 55' 0" S	54º 37' 15" W
11	Paraná	El Dorado	PNA – Argentina	26º 24' 2" S	54º 41' 40" W
12	Paraná	Lib. Gral. San Martin	SSRH – Argentina	26º 47' 30" S	55º 1' 27" W
13	Paraná	Puerto Mani	PNA – Argentina	27º 6' 22" S	55º 31' 21" W
14	Paraná	Santa Ana	PNA – Argentina	27º 20' 9" S	55º 35' 21" W
15	Paraná	Ita Cua (Posadas)	SSRH – Argentina	27º 25' 37" S	55º 47' 31" W
16	Paraná	Encarnación	ANNP – Paraguay	27º 21' 59" S	55º 51' 36" W
17	Paraná	Posadas	PNA – Argentina	27º 21' 39" S	55º 53' 11" W
18	Paraná	CHY	EBY	27º 29’ 15” S	56º 43’ 47” W

Tabla 2.2. *Períodos disponibles de los datos hidrométricos.*

#	Estación	Aforos	Niveles	Caudal
1	Capanema	NO	Ene/1977-Dic/1996	Ene/1977-May/2012
2	Perfil Tipo	NO	Ene/1924-Abr/2012	NO
3	Salto Cataratas	NO	Ene/1942-Dic/1996	Ene/1942-Dic/1996
4	Puerto Andresito	May/1984-Feb/2012	Sep/1983-Mar/2012	Sep/1983-Dic/2011
5	Iguazú	NO	Nov/1913-Mar/2012	NO
6	Guaira	NO	NO	Jun/1920-Dic1993
7	Itaipu	NO	NO	Dic/1993-May/2012

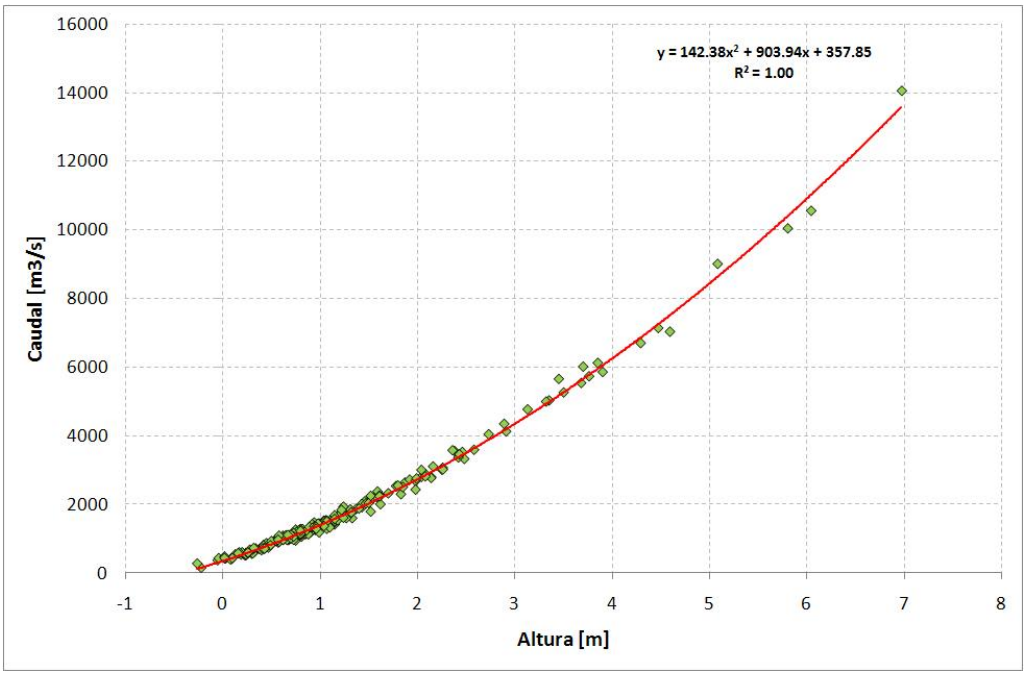
#	Estación	Aforos	Niveles	Caudal
8	R11	NO	NO	Dic/1993-May/2012
9	Ita Cajón	NO	Nov/1987-Abr/2012	NO
10	Libertad	NO	Abr/1993-May/2012	NO
11	El Dorado	NO	Abr/1993-May/2012	NO
12	Lib. Gral. San Martin	Abr/2008-Feb/2012	May/2008-Mar/2012	NO
13	Puerto Mani	NO	Abr/1997-May/2012	NO
14	Santa Ana	NO	Ene/1987-Jul/2009	NO
15	Ita Cua (Posadas)	Jul/1982-Mar/2012	Jul/1910-Abr/2012	Jul/1910-Ago/2011
16	Encarnación	NO	NO	NO
17	Posadas	NO	Ene/1982-May/2012	NO
18	CHY	NO	NO	Sep/1994-May/2012

2.3 Curvas altura-caudal

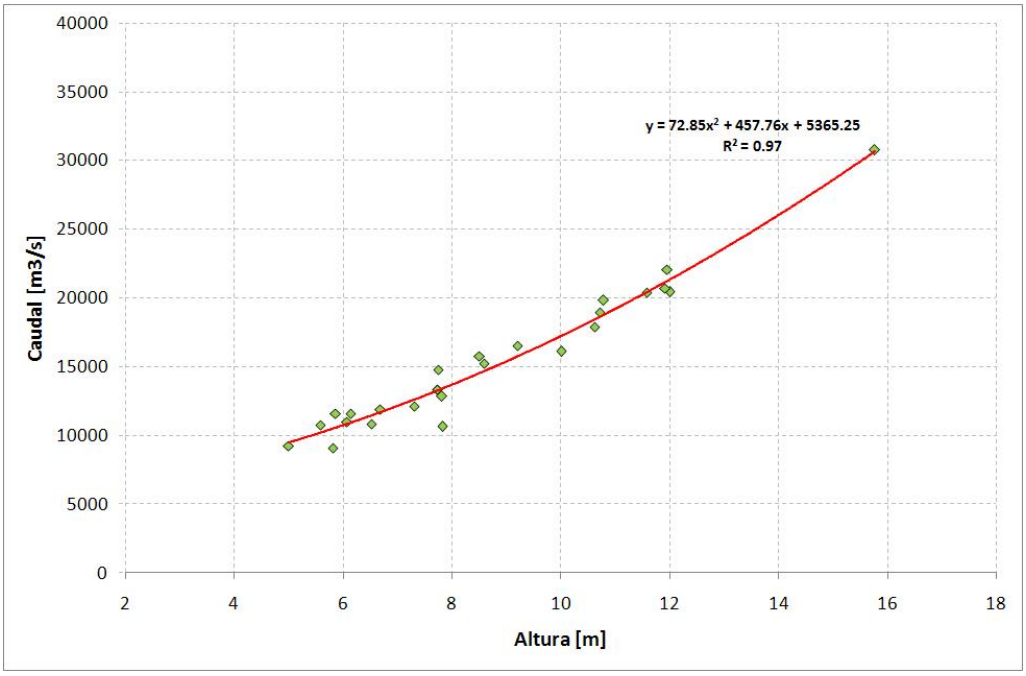
Todas las estaciones que presentan información de aforos contienen datos hasta el presente, salvo Ita Cuá, que se discontinuó debido a la construcción de la presa de Yacyretá. Estos datos fueron utilizados para construir curvas altura-caudal actualizadas para cada estación. En la Figura 2.3 se presentan los aforos y las curvas ajustadas, mientras que en la Tabla 2.3 se resumen las ecuaciones de las curvas altura-caudal junto con un indicador de ajuste (coeficiente de determinación, R^2).

Tabla 2.3. *Resumen de curvas altura-caudal actualizadas (Q = caudal; H = altura en la escala local).*

Estación	Ecuación	R^2
Andresito	$Q = 142.38\ H^2 + 903.94\ H + 357.85$	1.00
Lib. Gral. San Martín	$Q = 72.85\ H^2 + 457.76\ H + 5365.25$	0.97



a) Puerto Andresito – Río Iguazú



b) Libertador General San Martín – Río Paraná

Figura 2.3. *Curvas altura-caudal.*

En Andresito existen tres versiones de curvas altura-caudal, que se presentan en la Tabla 2.4: una de CIDY (Consultores Internacionales de Yacyretá), una del COAH (Centro Operativo del Alerta Hidrológico, INA), y una de EVARSA. La curva obtenida en este informe se identifica como PAE 2012. Cada una tiene asociado un indicador de error (ECM = error cuadrático medio). Estas curvas se grafican en la Figura 2.4. Se observa que la curva de EVARSA tiende a subestimar los caudales. Las tres restantes muestran un comportamiento similar, con la curva presente (PAE 2012) indicando un mejor ajuste para los caudales altos.

Tabla 2.4. *Curvas altura-caudal en Andresito.*

Fuente	Curva altura-caudal	ECM [m3/s]
PAE 2012	$Q = 142.38\ H^2 + 903.94\ H + 357.85$	1059
CIDY	$Q = 121.68\ H^2 + 943.38\ H + 448.00$	1102
COAH	$Q = 117.19\ (H+1)^2 + 716.5\ (H+1) - 490.7$	1036
EVARSA	SI $H<1.2$: $Q = 0.004604126\ (H*100)^2 + 9.84419\ (H*100) + 390.8857$ SI $H>=1.2$: $Q = 0.012137\ (H*100)^2 + 7.916995\ (H*100) + 457.0945$	952

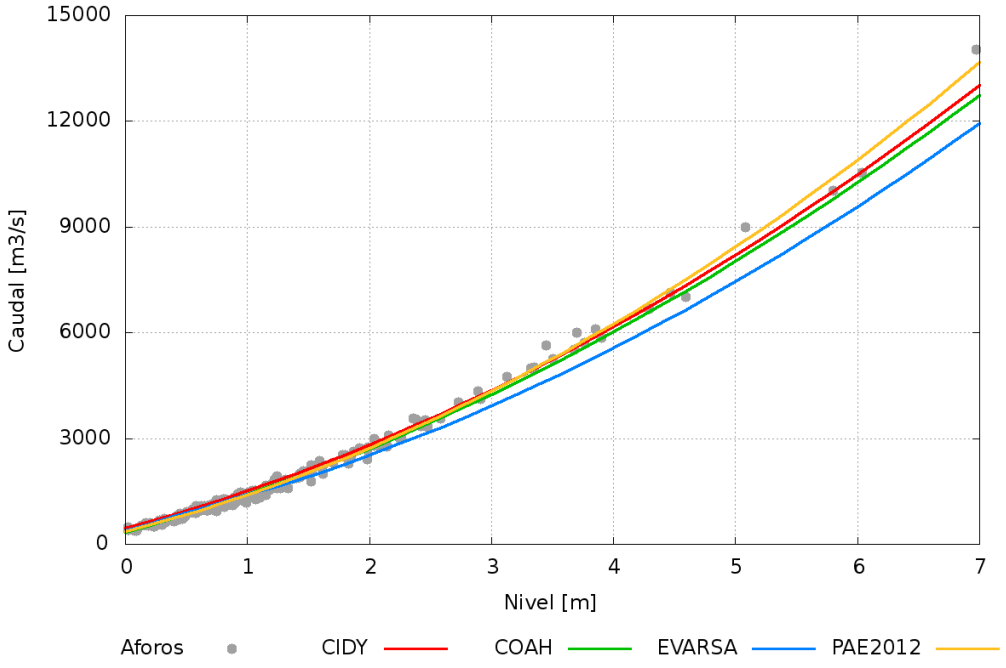


Figura 2.4. *Curvas altura-caudal y aforos en Andresito.*

Cerca del Punto Trifinio se dispone de curvas altura-caudal en R11 (fuente: Itaipú) y en Ita Cajón (fuente: COMIP), presentadas en la Tabla 2.5. Ambas arrojan resultados similares. Los datos utilizados en este informe para caracterizar este punto corresponden a los caudales obtenidos con la curva de R11.

Tabla 2.5. *Curvas altura-caudal en Punto Trifinio.*

Estación	Ecuación	H
R11	Si H<89.5 $Q = 275.1149 (H-89.26)^2 + 375.1259 (H-89.26) + 5655.085$ Si H>=89.5 $Q = 21.23476 (H-89.26)^2 + 366.2538 (H-89.26) + 5656.15$	m IBGE (BRA)
Ita Cajón	$Q = 21.192 * (H-89.32)^2 + 367.68 (H-89.32) + 5666.8$	m IGM (ARG)

2.4 Series de caudal simultáneas

2.4.1 Selección

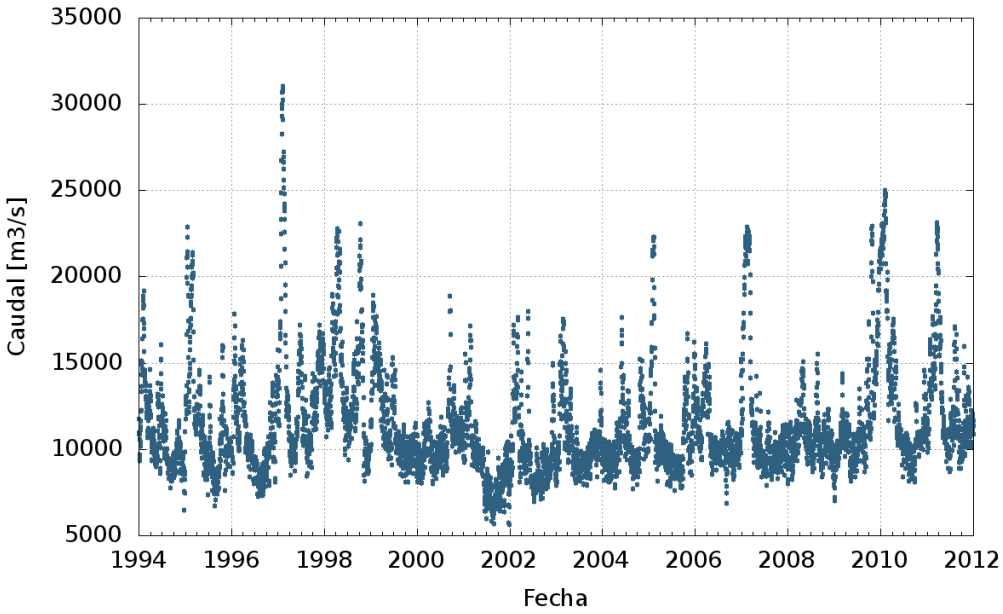
A partir de la base de datos colectada, se buscó la ventana de tiempo con mayor simultaneidad de datos de caudal medio diario (y más cercana al presente) de modo de poder efectuar comparaciones. Resultó el período que va desde el 1 de Enero de 1994 al 31 de Diciembre de 2011 (18 años). Dentro de este período, las estaciones con series de caudales representativas de los diversos tramos de río son las siguientes (ver Figura 2.2):

- Río Paraná aguas arriba del Punto Trifinio: estación Itaipú (ITA).
- Río Paraná aguas abajo del Punto Trifinio: estación R11.
- Río Iguazú: estaciones Capanema (CAP) y Andresito (AND).

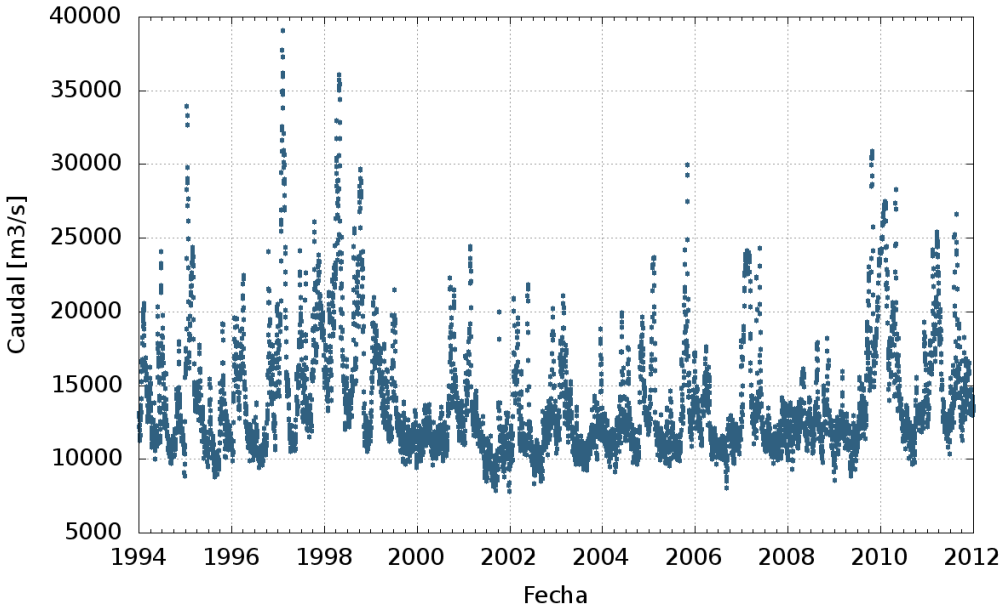
En la Figura 2.5 se presentan las series de caudal medio diario para cada una de estas cuatro estaciones.

2.4.2 Estadística descriptiva

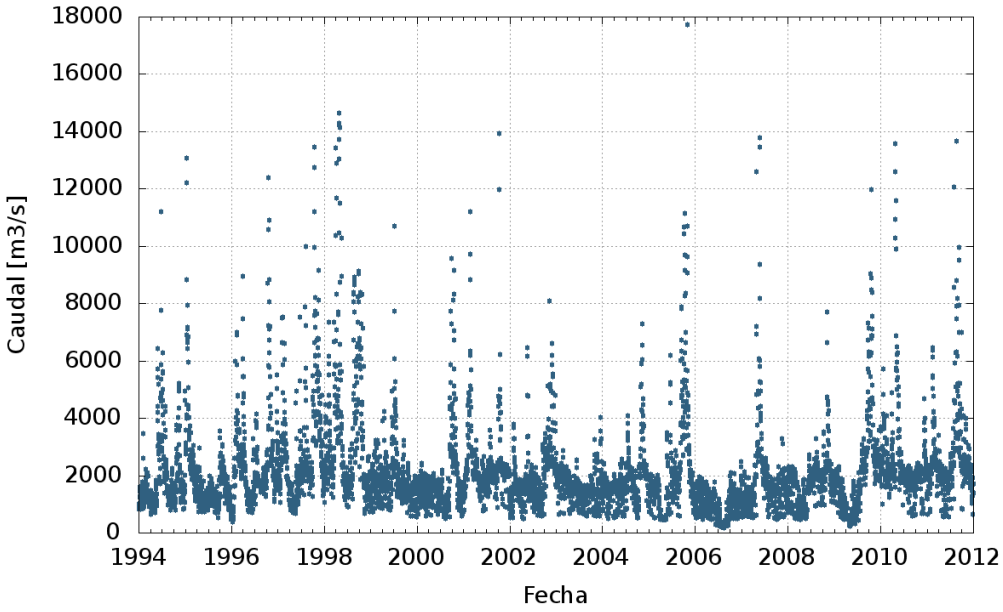
En la Figura 2.6 se muestran los histogramas de frecuencia de ocurrencia para las cuatro series de caudales medios diarios simultáneas. Por su parte, en la Tabla 2.6 se indican los valores de sus estadísticos básicos. Se observa que la variabilidad (medida por el coeficiente de variación CV) es muy alta para el Iguazú (del orden del 80%) y relativamente baja para el Paraná (del orden del 30%). La asimetría por la existencia de una cola de altos valores de caudal (medida por el coeficiente de sesgo CS, positivo en todos los casos) es más significativa para el Iguazú; en el caso del Paraná, se nota una tendencia decreciente hacia aguas abajo, que se asocia al efecto de difusión de las ondas de crecida. La esbeltez de la distribución (medida por el coeficiente de curtosis CC) es mucho mayor para el Iguazú; también este indicador tiende a disminuir hacia aguas abajo para el río Paraná, lo cual vuelve a estar ligado al efecto de difusión de las ondas de crecida.



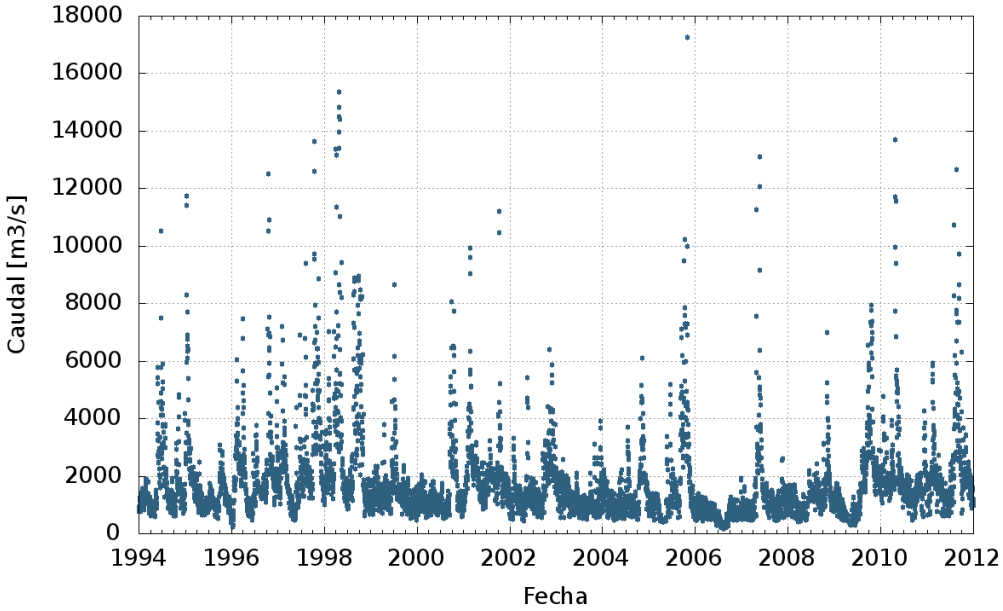
a) Río Paraná - Itaipú



b) Río Paraná - R11

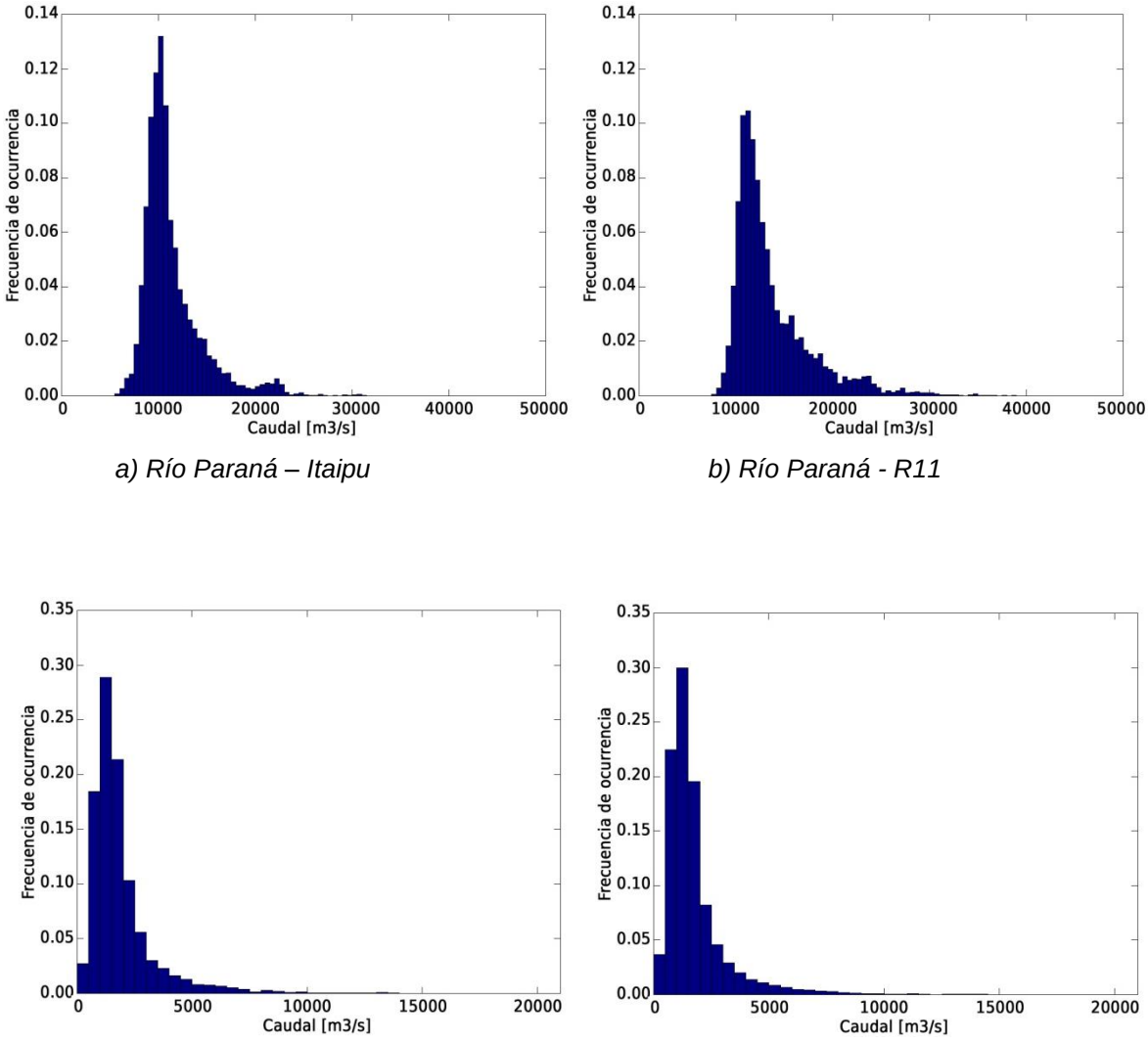


c) Río Iguazú – Capanema



d) Río Iguazú – Andresito

Figura 2.5. *Series de caudal medio diario (1994-2011).*



a) Río Paraná – Itaipu

b) Río Paraná - R11

c) Rio Iguazú – Capanema

d) Río Iguazú – Andresito

Figura 2.6. *Histograma de frecuencias de las series de caudal medio diario (1994-2011).*

Tabla 2.6. *Estadísticos de las series de caudal medio diario elegidas (1994-2011): Máximo (MAX), medio (MED), mínimo (MIN), desvío estandar (DES), coeficiente de variación (CV = DES/MED), coeficiente de sesgo (CS); coeficiente de curtosis (CC), percentil 10 (P10), percentil 50 (P50) y percentil 90 (P90).*

RIO	Iguazú		Paraná	
	CAP	AND	ITA	R11
MAX [m^3/s]	16480	17273	31050	38932
MED [m^3/s]	1899	1782	11410	13699
MIN [m^3/s]	190	181	5636	7821
DES [m^3/s]	1505	1488	3146	4033
CV	79%	84%	28%	29%
CS	3.2	3.5	2.0	1.8
CC	15.1	17.6	5.4	4.1
P10 [m^3/s]	737	685	8700	10252
P50 [m^3/s]	1500	1386	10503	12351
P90 [m^3/s]	3436	3240	15239	19066

En la Figura 2.7 se presenta un esquema en donde se indican los valores de los caudales medios diarios máximos, medios y mínimos. Se observa que los valores medios dan un razonable balance de masa en las dos confluencias, mientras que los valores extremos muestran una tendencia a la atenuación (hacia aguas abajo disminuyen los valores máximos y aumentan los mínimos), lo cual se asocia a efectos de difusión.

Como complemento, la Figura 2.8 muestra las distribuciones de frecuencia acumuladas del caudal medio diario para las distintas estaciones. En la Figura 2.9 ellas se representan en términos del caudal adimensionalizado, determinado como la desviación respecto del caudal medio, dividido por la desviación estándar. Las correspondientes al tramo del río Paraná sin aportes significativos (Figura 2.8a) muestran como hacia aguas abajo la distribución tiende a hacerse algo menos empinada – lo cual significa menos esbelta – y a saturarse un poco antes – lo cual significa una cola positiva atenuada. Las distribuciones de las dos estaciones del río Iguazú (Figura 2.8b) prácticamente no difieren entre sí. Considerando las tres estaciones más cercanas al Punto Trifinio (Figura 2.8c), se observa cómo el aporte del río Iguazú modifica la distribución del río Paraná, disminuyendo su esbeltez y atenuando sus colas positiva y negativa en forma relativamente significativa.

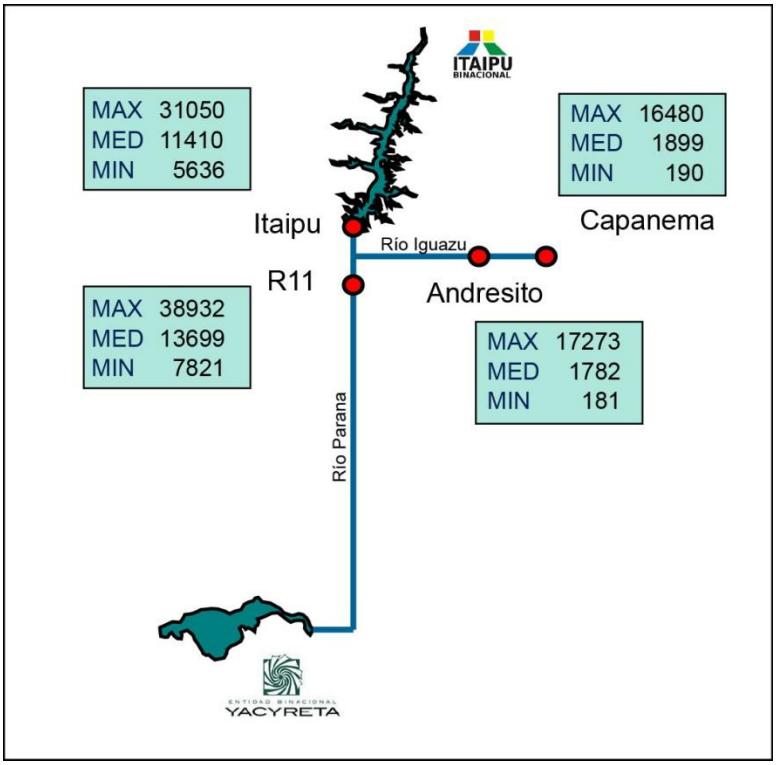
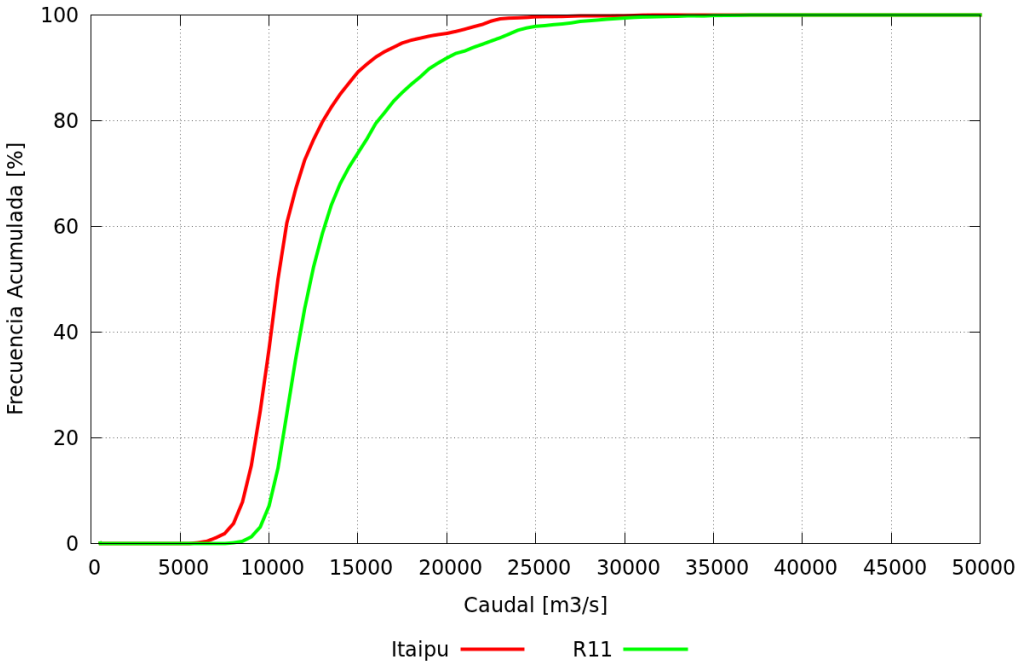
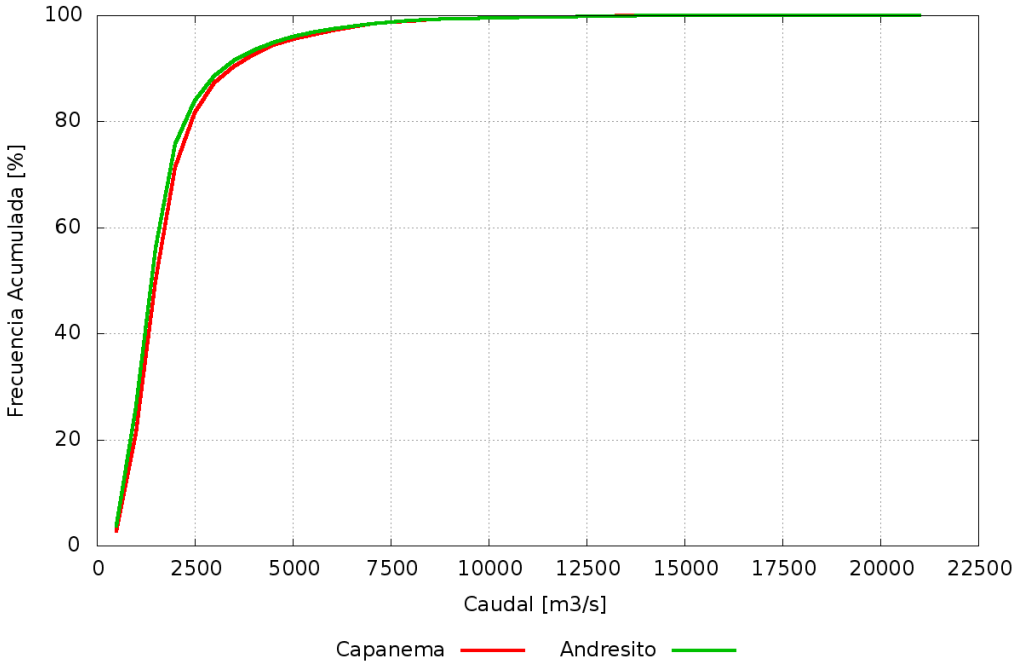


Figura 2.7. *Esquema de distribución de caudales.*

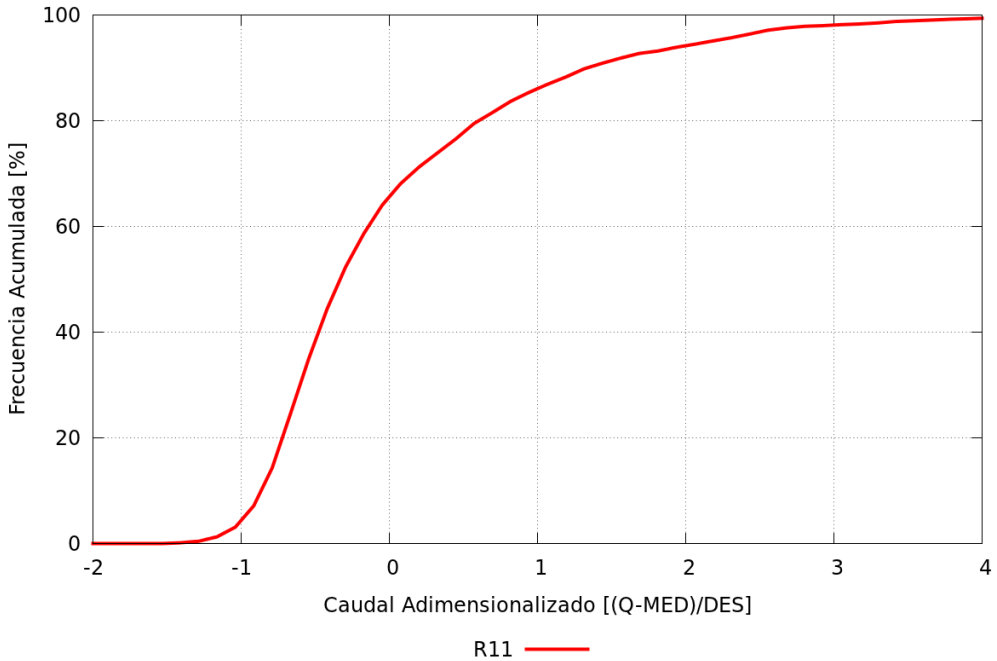


a) Río Paraná

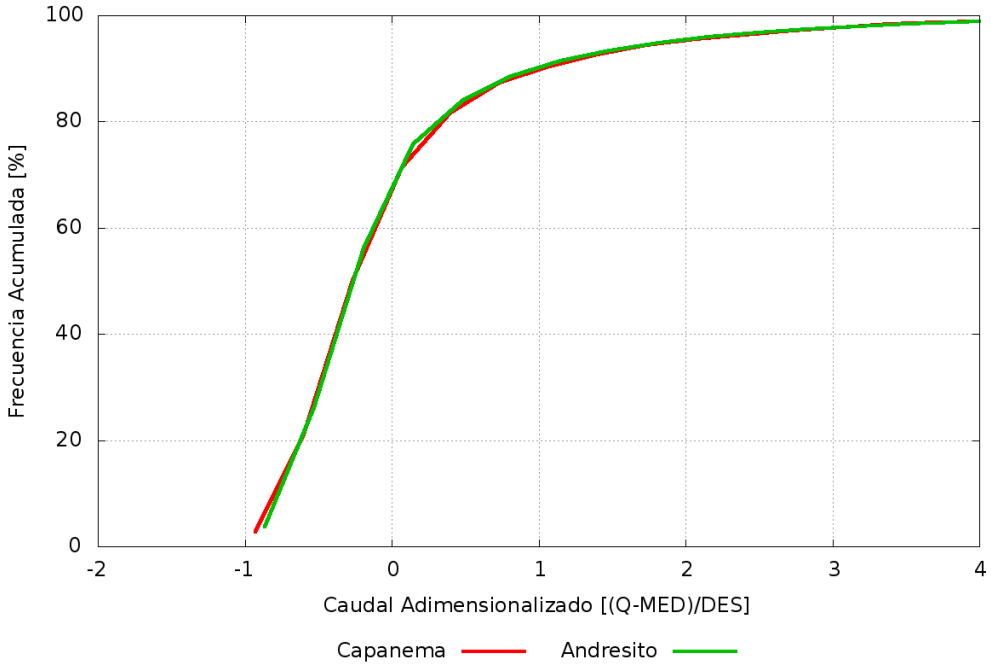


b) *Río Iguazú*

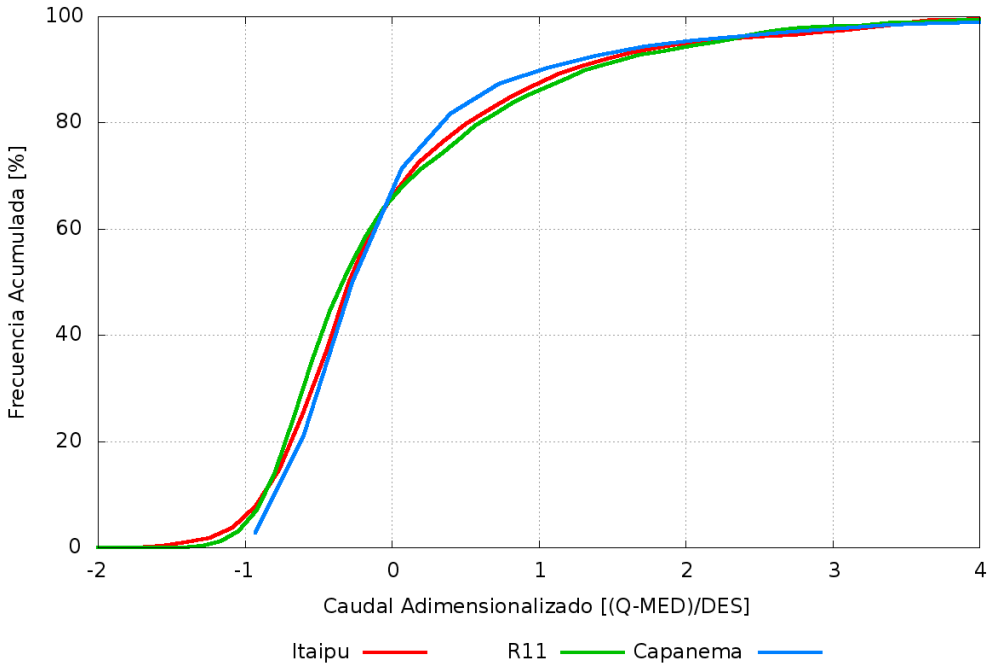
Figura 2.8. *Frecuencias acumuladas.*



a) *Río Paraná*



b) *Río Iguazú*



c) *Punto Trifinio*

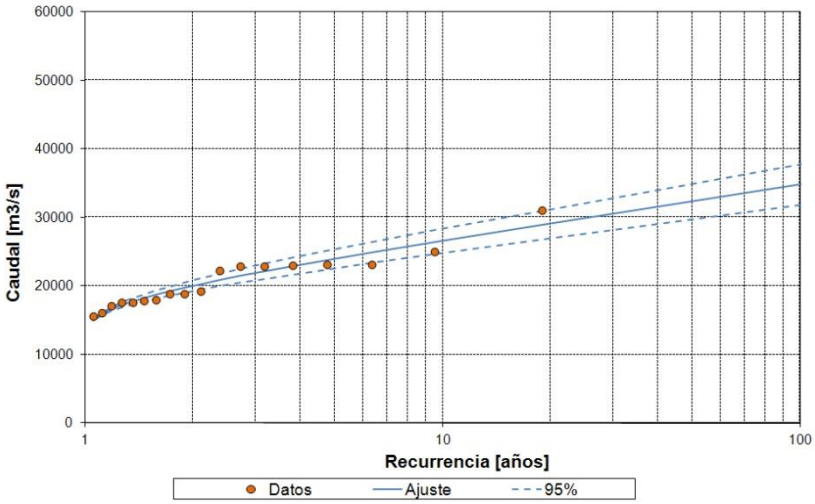
Figura 2.9. *Frecuencias acumuladas con caudales adimensionalizados.*

2.4.3 Análisis de valores extremos

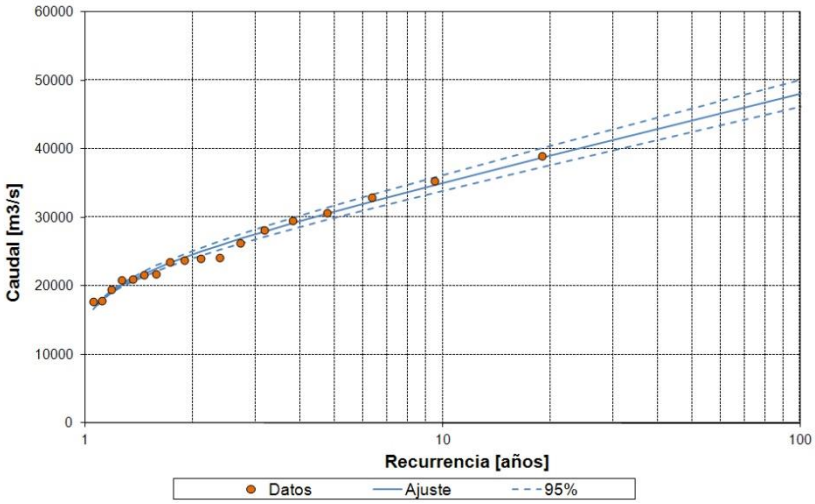
A cada una de las cuatro series temporales de caudal del período 1994-2011 se le extrajeron los máximos anuales (Tabla 2.7), a estos se le asignaron períodos de retorno (o tiempos de recurrencia) de acuerdo a la fórmula de Weibull (interpretándolos como caudales pico de crecida), y a cada conjunto se le ajustó una Distribución de Gümbel (Distribución Generalizada de Valor Extremo, GEV, Tipo I), que habitualmente se utiliza para el estudio de extremos de caudales. En la Figura 2.10 se muestran los ajustes obtenidos, incluyendo el intervalo de confianza del 95%.

Tabla 2.7. *Máximos anuales de las series de caudal medio diario (1994-2011) (en m^3/s).*

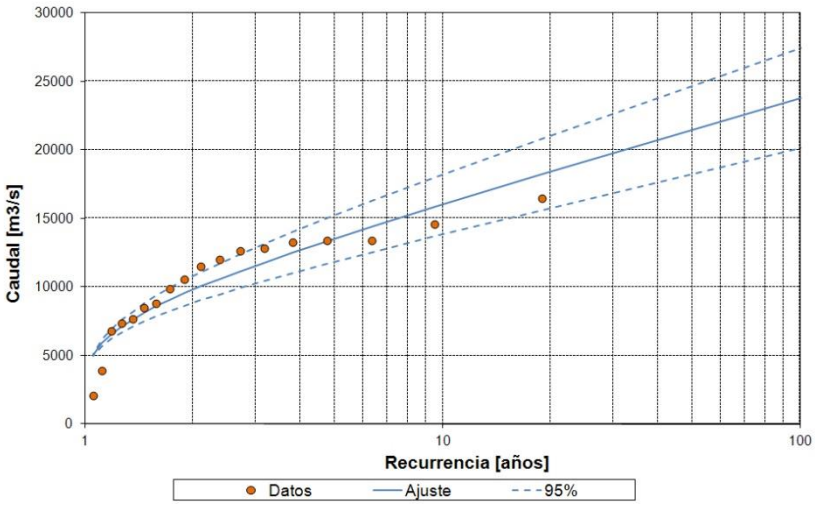
Año	Iguazú		Paraná	
	CAP	AND	ITA	R11
1994	10574	10527	19196	23566
1995	11514	11730	22895	32934
1996	11988	12501	17836	23803
1997	13393	13650	31050	38932
1998	14600	15360	23100	35356
1999	9879	8645	18913	20986
2000	8777	8067	18906	21728
2001	12646	11209	17140	24177
2002	7645	6401	17977	21695
2003	3883	3908	17560	20854
2004	6792	6112	17638	19523
2005	16480	17273	22302	29532
2006	2068	1938	16113	17823
2007	12842	13103	22885	24086
2008	7351	7004	15540	17773
2009	8495	7948	22960	30640
2010	13245	13698	25035	28137
2011	13402	12660	23140	26283



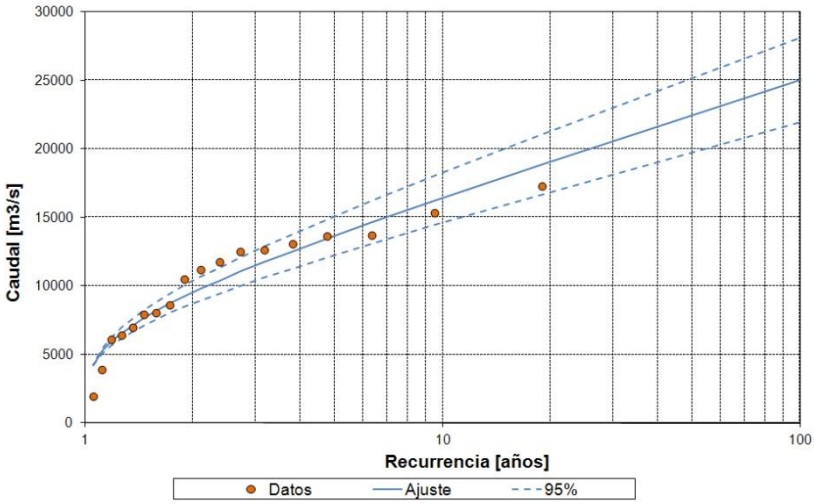
a) Río Paraná - Itaipu



b) Río Paraná - R11



c) Río Iguazu – Capanema



d) Río Iguazu – Andresito

Figura 2.10. *Ajuste de la Distribución de Gümbel*

Las distribuciones ajustadas se utilizaron para determinar los caudales asociados a períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años, los cuales se presentan en la Tabla 2.8. Algunos de ellos se repiten en el esquema de la Figura 2.11. Nótese que estos caudales surgen de series de 18 años de extensión, de modo que los correspondientes a recurrencias de 50 y 100 años se calculan mediante alejadas extrapolaciones. Se observa que, para cada recurrencia, el caudal del Paraná luego del Punto Trifinio es menor que la suma de los caudales del Paraná antes del Punto Trifinio y del Iguazú, lo que indicaría que los picos de crecida asociados a esa recurrencia no tienden a darse simultáneamente.

Tabla 2.8. *Caudales para distintos períodos de retorno (en m^3/s).*

Recurrencia (años)	**Iguazú**		**Paraná**	
	CAP	AND	ITA	R11
2	9804	9535	22600	24583
5	13544	13685	22773	30879
10	16020	16432	31199	35048
20	18395	19068	34484	39046
50	21469	22479	38737	44222
100	23773	25035	41924	48100

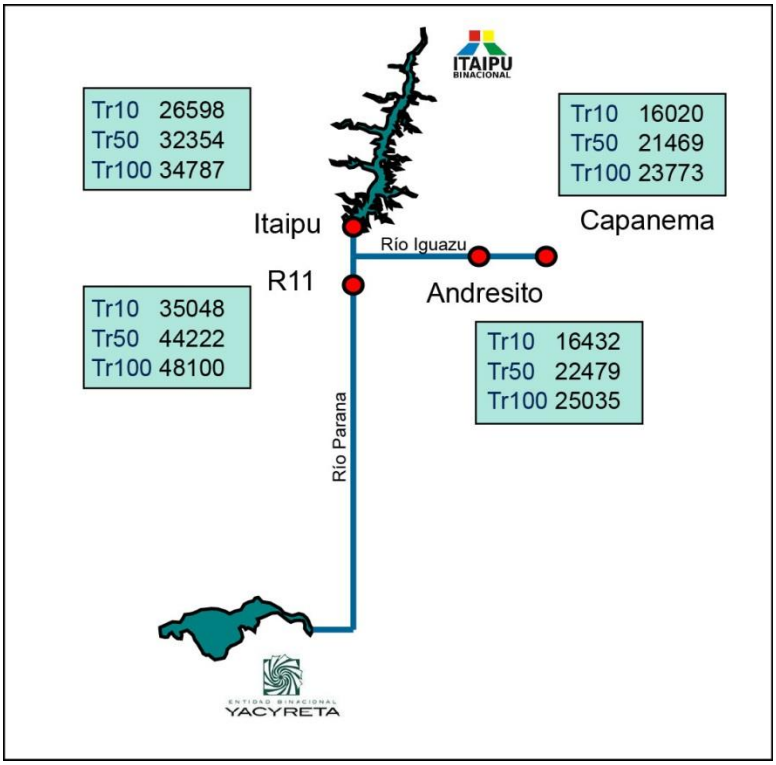


Figura 2.11. *Esquema de distribución de caudales para distintas recurrencias.*

2.5 Series de caudal prolongadas

2.5.1 Selección

Como complemento del análisis presentado en la sección anterior, se tomaron las series temporales más extensas posibles de caudal medio diario para cada río del sistema bajo estudio, con el objetivo de aumentar la precisión de las estadísticas asociadas a cada uno.

Para el río Iguazú se tomó la estación Capanema, con datos sobre el período 1977-2011 (34 años).

Para el río Paraná se seleccionó la estación Ita Cuá (Posadas), en la cola del embalse de Yacyretá, completada criteriosamente. Esta estación posee una serie histórica de niveles desde 1901, con aforos sistemáticos desde 1955, y fue mantenida hasta el año 2000. El llenado del embalse de Yacyreta modificó, desde 1994, la relación entre el caudal aforado y el nivel observado (Figura 2.12). Por lo tanto, para el armado de la serie de caudales medios diarios se la utilizó sólo hasta el año 1993. Se analizaron dos alternativas para completar esa serie hasta el año 2011:

i. Trasladar los datos completos desde 1994-2011 desde la estación R11 (situada a 320 km aguas arriba). Se aplicó un tiempo de retardo de 1 día, según lo estimado en Harza y Consorciados (1992).

ii. Utilizar la serie de niveles de la estación Libertador General San Martin (situada a 140 km aguas arriba) desde 1994, transformándolo a caudales en base a un ajuste de la serie de aforos de 2008-2011 (curva clave presentada en el capítulo 2).

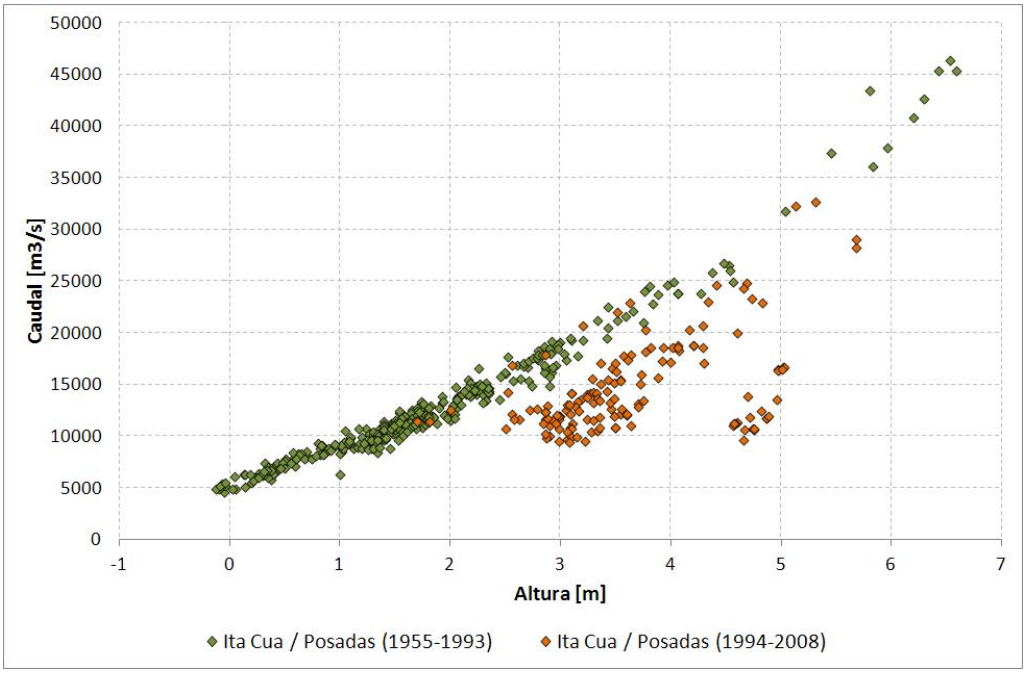


Figura 2.12. *Aforos de los períodos con y sin obra en Ita Cua - Posadas.*

La comparación entre ambas alternativas se efectuó para el año 1994, que es el de transición entre el río en estado natural y represado, durante el cual el efecto de la obra en la estación Ita Cuá (Posadas) se considera todavía incipiente. Las dos series construidas se muestran en la Figura 2.13. Se observa que resultan muy similares entre sí, y compatibles con lo que surge de la estación Ita Cuá (Posadas). Debido a que la serie niveles en Libertador General San Martín presenta algunos vacíos de información, para completar Ita Cuá se seleccionó la estrategia basada en R11. Se generó así una serie de 110 años.

En la Figura 2.14 se muestran las dos series de caudales medios diarios seleccionadas.

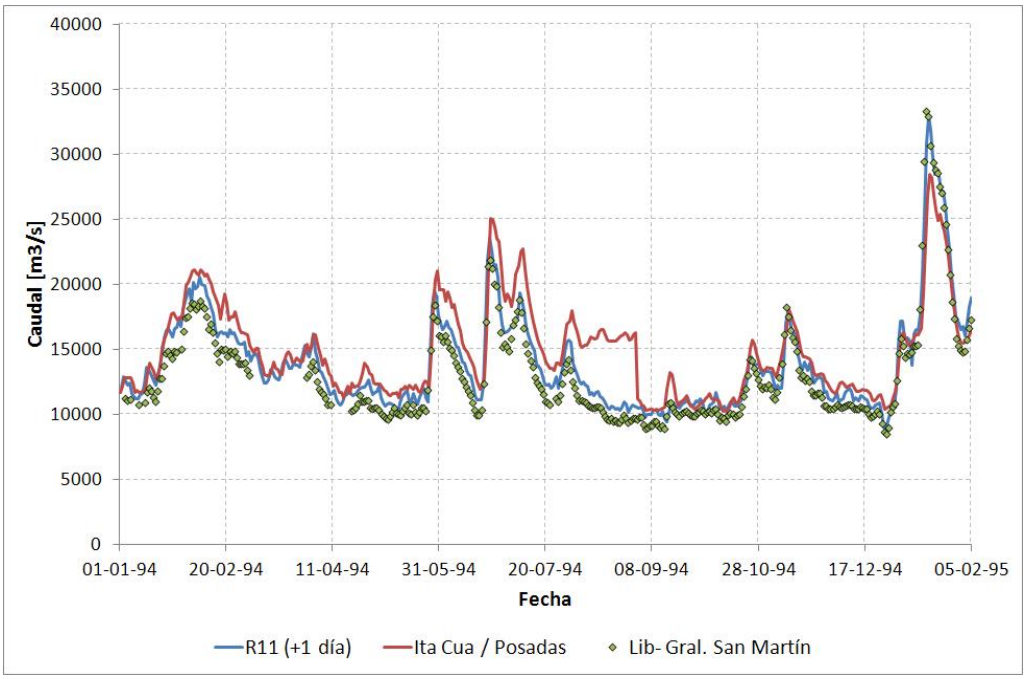
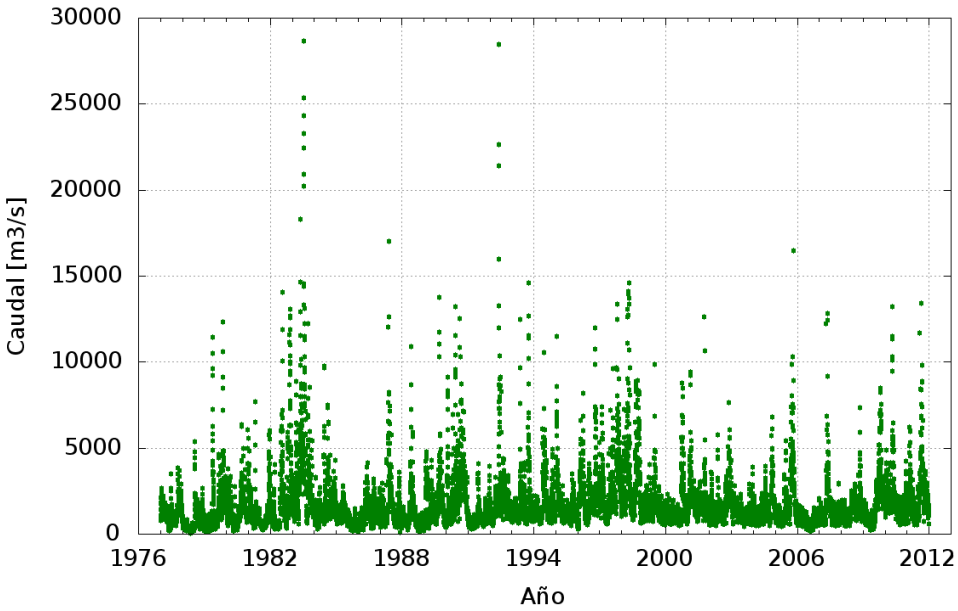
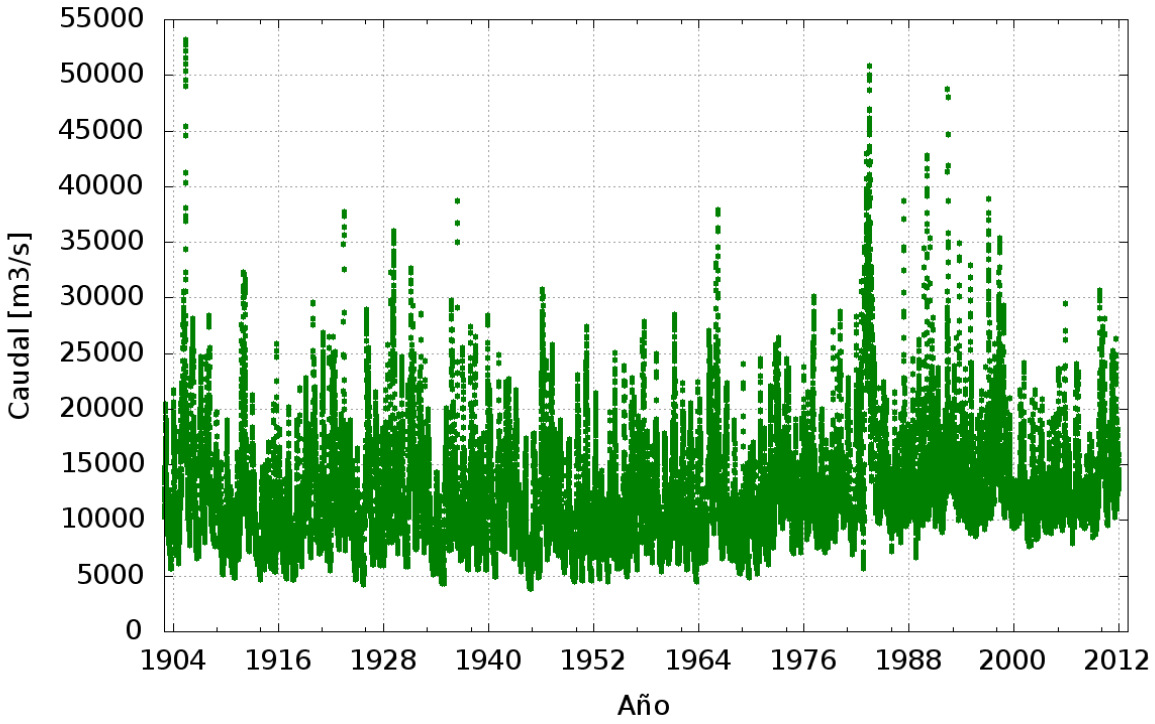


Figura 2.13. *Series de caudales medios diarios para completar Ita Cua - Posadas.*



a) Río Iguazú - Capanema



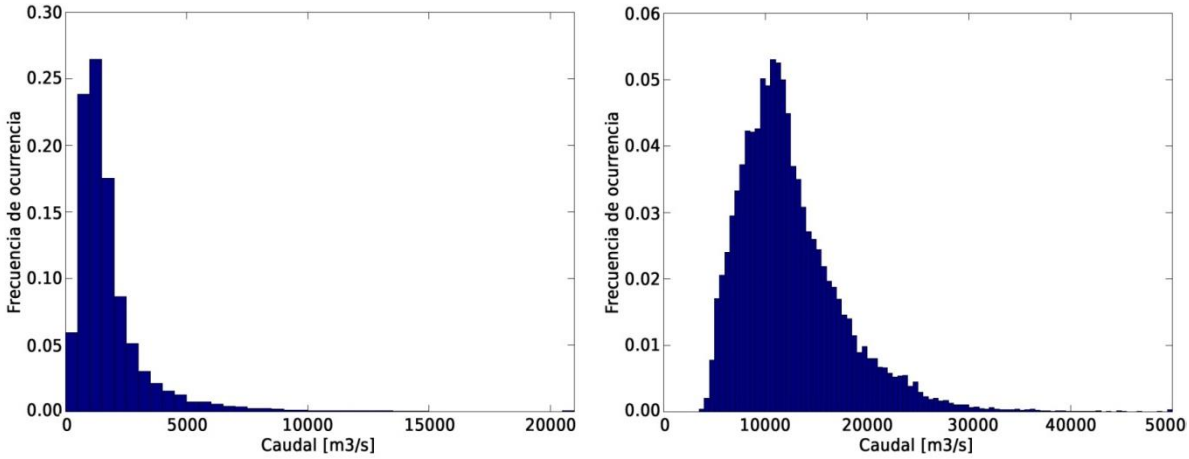
b) Río Parana – Ita Cua–Posadas

Figura 2.14 *Series de caudales medios diarios.*

2.5.2 Estadística descriptiva

Se construyó el histograma de frecuencias de ocurrencia de cada una de las series de caudales medios diarios (Figura 2.15).

Los estadísticos que describen las características de cada una de las series se presentan en la Tabla 2.9. Comparando con los correspondientes a las series cortas (Tabla 2.6), la única diferencia que se considera significativa es la duplicación de la esbeltez para el río Iguazú (CC de 15 a 30 aproximadamente).



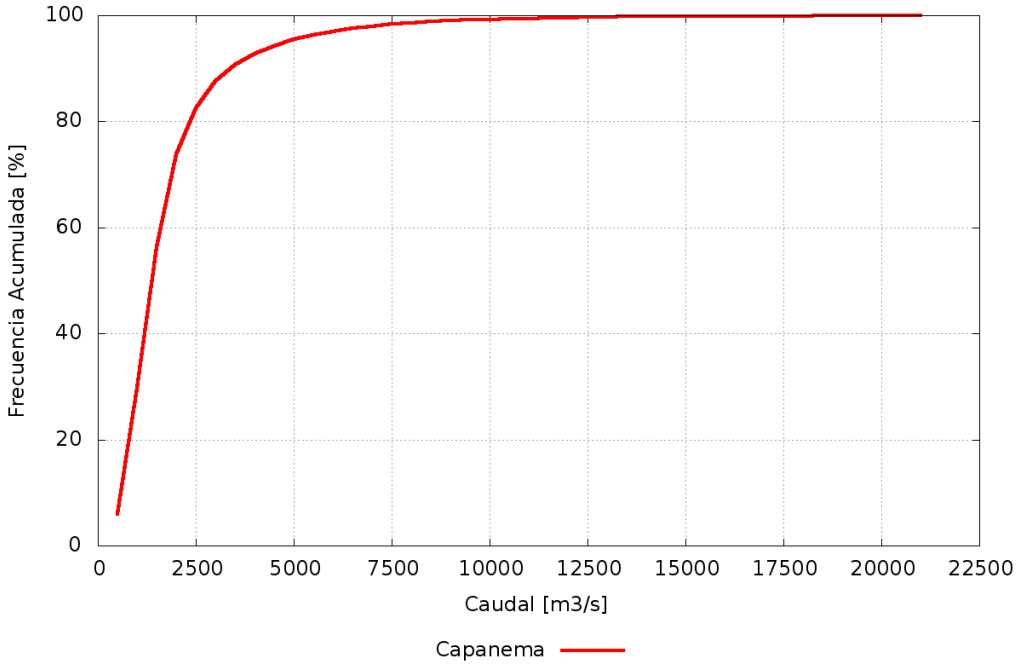
a) Río Iguazu – Capanema *b) Río Paraná – Ita Cua - Posadas*

Figura 2.15 *Histograma de frecuencia.*

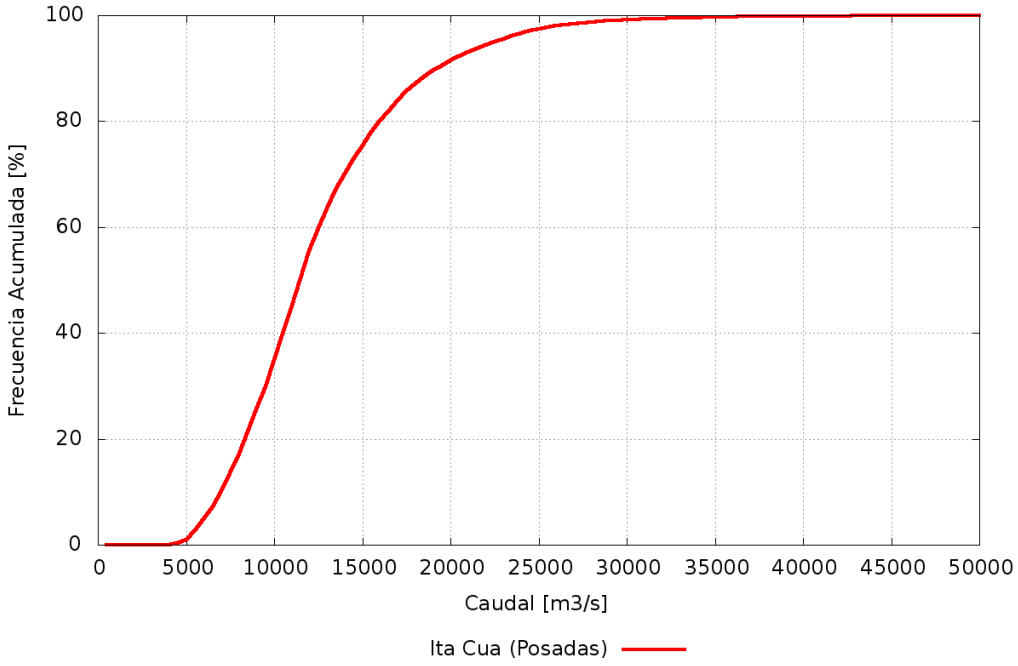
Tabla 2.9. *Estadísticos de las series de caudal medio diario seleccionadas: Máximo (MAX), medio (MED), mínimo (MIN), desvío estandar (DES), coeficiente de variación (CV = DES/MED), coeficiente de sesgo (CS); coeficiente de curtosis (CC), percentil 10 (P10), percentil 50 (P50) y percentil 90 (P90).*

RIO	Iguazú	Paraná
	Capanema	**Ita Cua - Posadas**
MAX *[m^3/s]*	28650	53227
MED *[m^3/s]*	1819	12479
MIN *[m^3/s]*	66	3906
DES *[m^3/s]*	1721	5166
CV	94%	41%
CS	4.4	1.5
CC	34.2	4.0
P10 *[m^3/s]*	592	6984
P50 *[m^3/s]*	1370	11471
P90 *[m^3/s]*	3380	19205

La Figura 2.16 muestra las distribuciones de frecuencia acumuladas del caudal medio diario para las distintas estaciones. En la Figura 2.17 ellas se representan conjuntamente en términos del caudal adimensionalizado (desviación respecto del caudal medio, dividido por la desviación estándar). Se observa una gran similitud entre las correspondientes al río Paraná. La del río Iguazú es la más esbelta y la de colas más atenuadas.



a) Río Iguazú – Capanema



b) Río Paraná – Ita Cua (Posadas)

***Figura 2.16** Frecuencias acumuladas.*

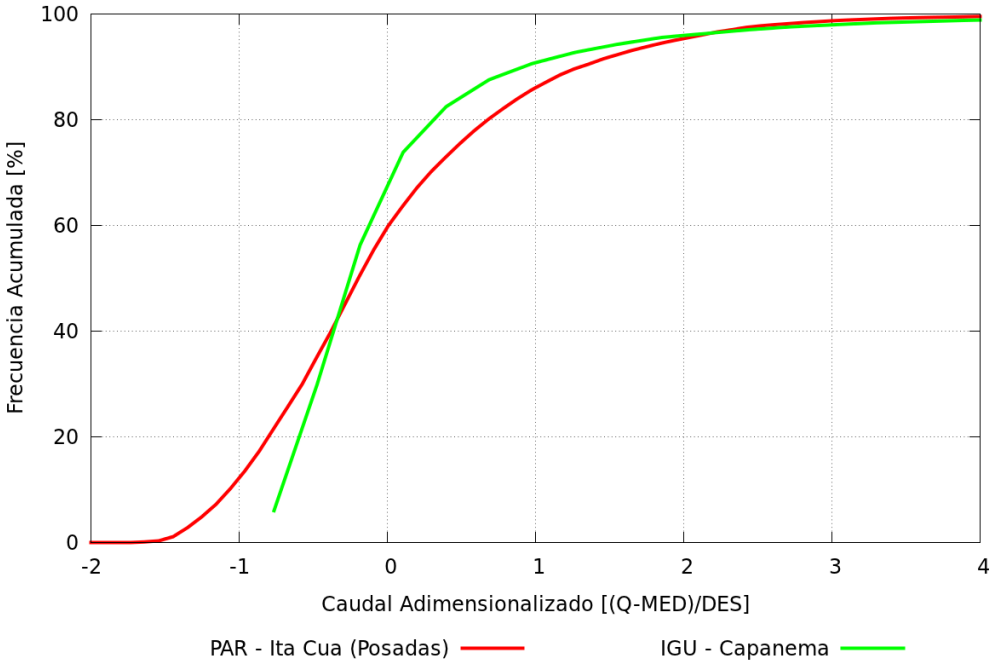


Figura 2.17 *Frecuencias acumuladas con caudales adimensionalizados.*

2.5.3 Análisis de valores extremos

La Figura 2.18 muestra las series de caudales medios diarios máximos anuales correspondientes a las dos series prolongadas seleccionadas. Se ajustó la Distribución de Gümbel a cada una de ellas (Figura 2.19). Los ajustes indicaron valores del coeficiente de determinación R^2 del orden de 0.98 para la serie del río Paraná y de 0.92 para la del río Iguazú, que se consideran satisfactorias, aunque las desviaciones para altas recurrencias son relativamente grandes. A partir de esos ajustes se determinaron los períodos de retorno indicados en la Tabla 2.10.

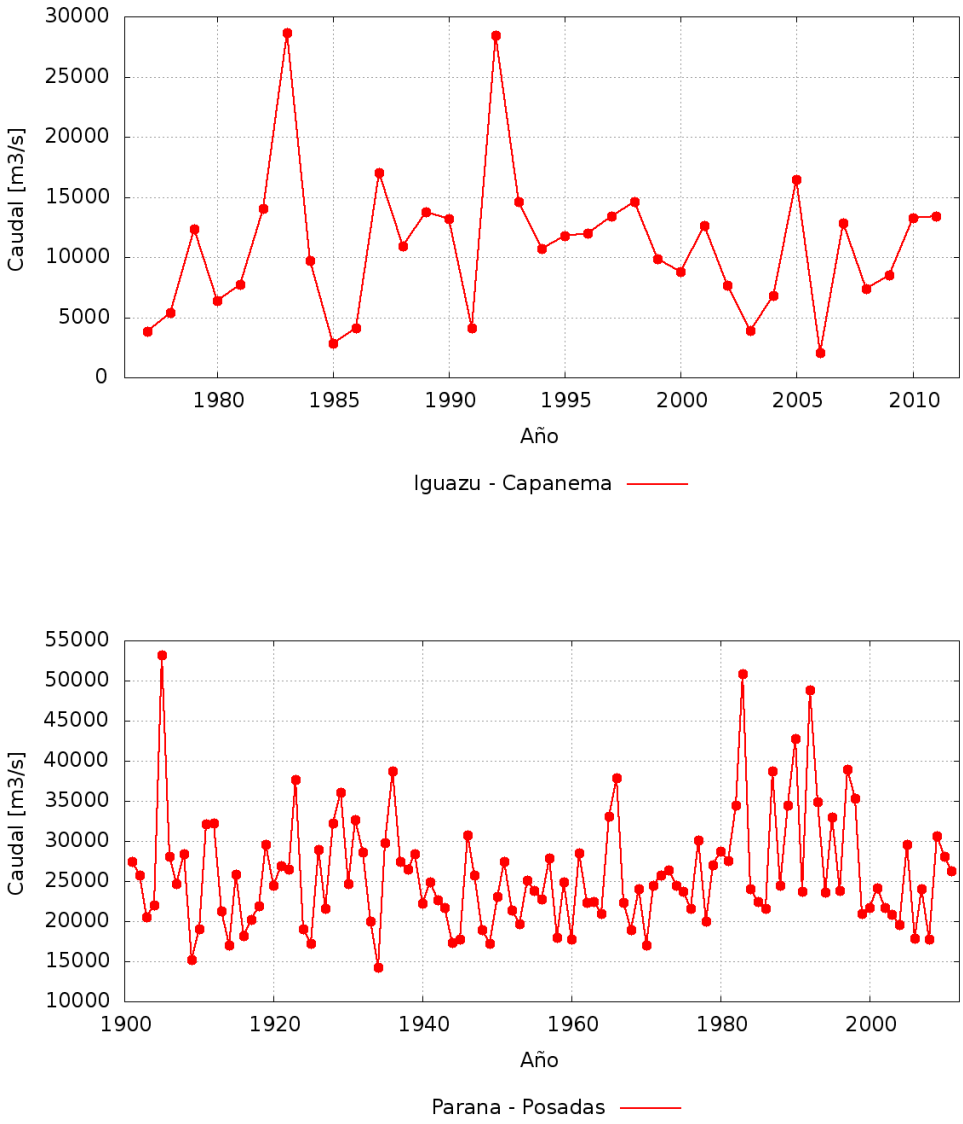
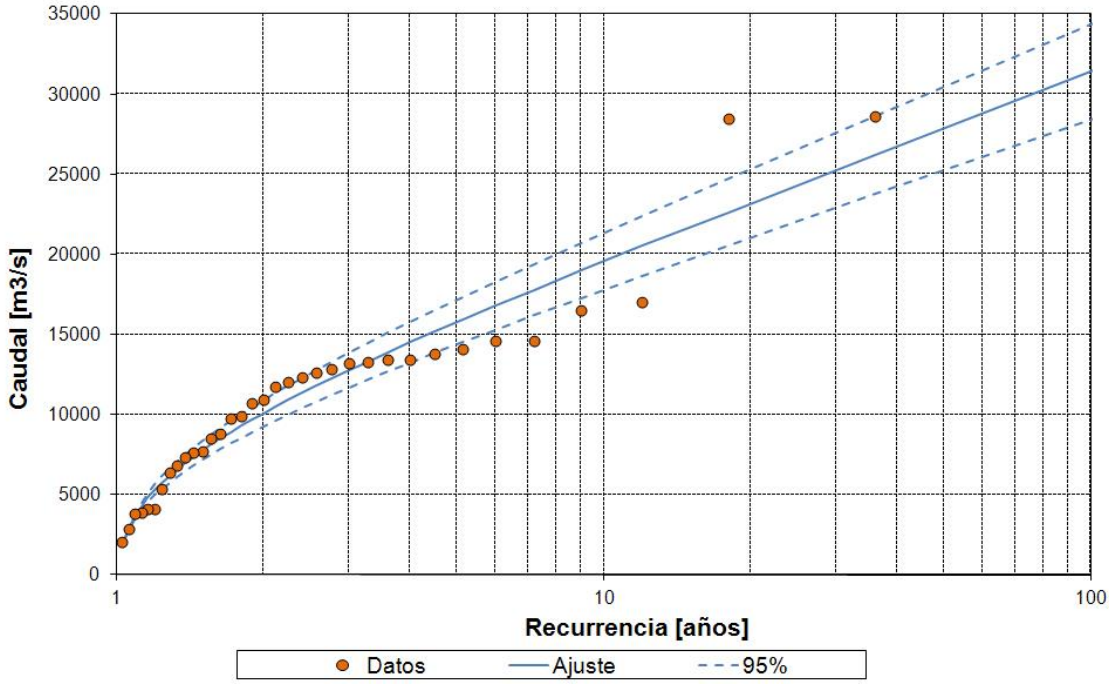
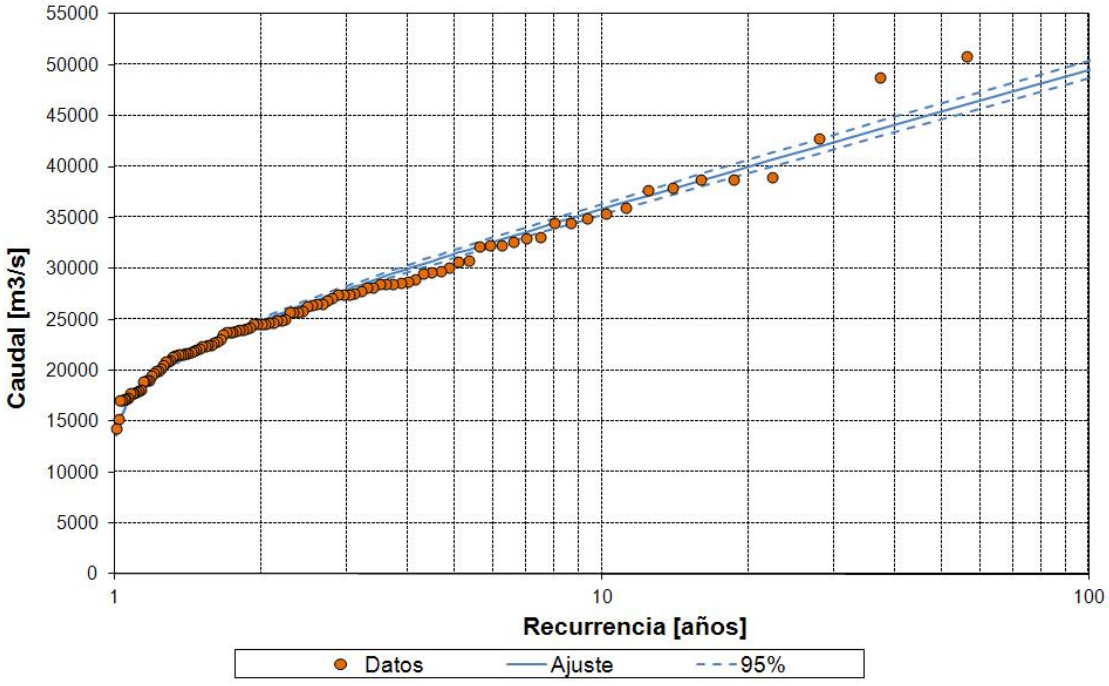


Figura 2.18 *Series de caudales medios diarios máximos anuales.*



a) Río Iguazú – Capanema



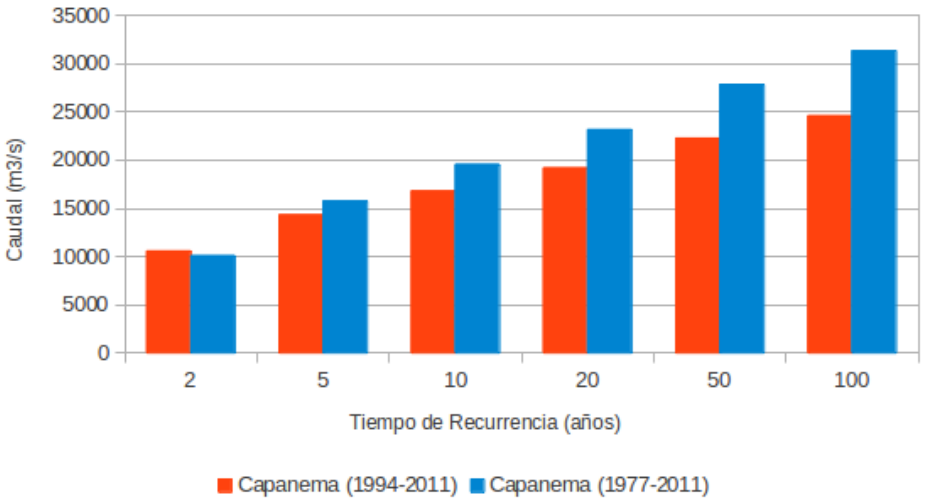
b) Río Parana – Posadas

Figura 2.19. *Ajuste de la Distribución de Gümbel*

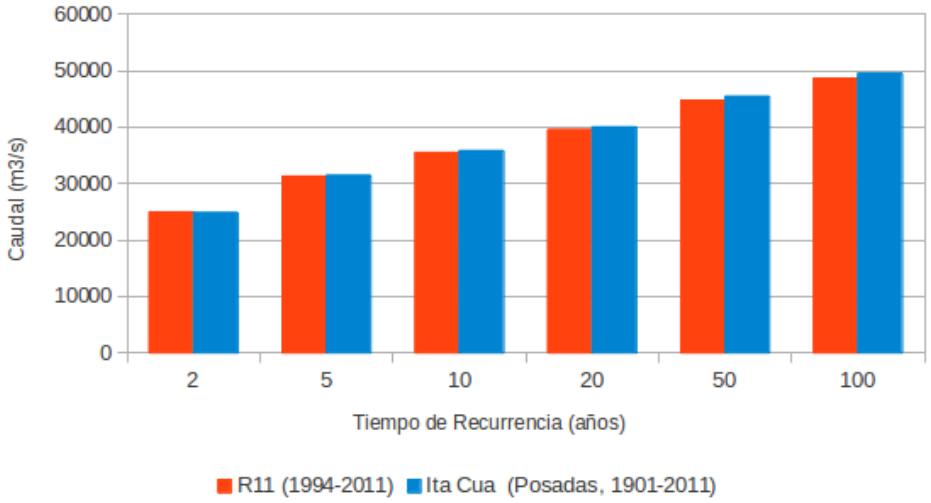
Tabla 2.10. *Caudales para los distintos períodos de retorno (en m^3/s).*

Recurrencia (años)	Iguazú	Paraná
	Capanema	Ita Cua - Posadas
2	10073	24831
5	15776	31441
10	19552	35818
20	23174	40016
50	27862	45450
100	31375	49521

Los resultados obtenidos con este ajuste fueron comparados con los de las series del período 1994-2011 (Figura 2.20). Se observa que los resultados son muy similares entre sí para el río Paraná. En el caso del río Iguazú se detecta un leve incremento en los valores asociados a la serie larga, lo que indica un nivel de riesgo algo mayor al previamente estimado.



a) Río Iguazú



b) *Río Paraná*

Figura 2.20. *Comparación de períodos de retorno de las series prolongadas versus las del período 1994-2011.*

Para el caso de la recurrencia de los caudales del río Paraná en Ita Cuá (Posadas), se compararon los valores obtenidos con los informados en estudios antecedentes (Figura 2.21), observándose un muy alto grado de compatibilidad.

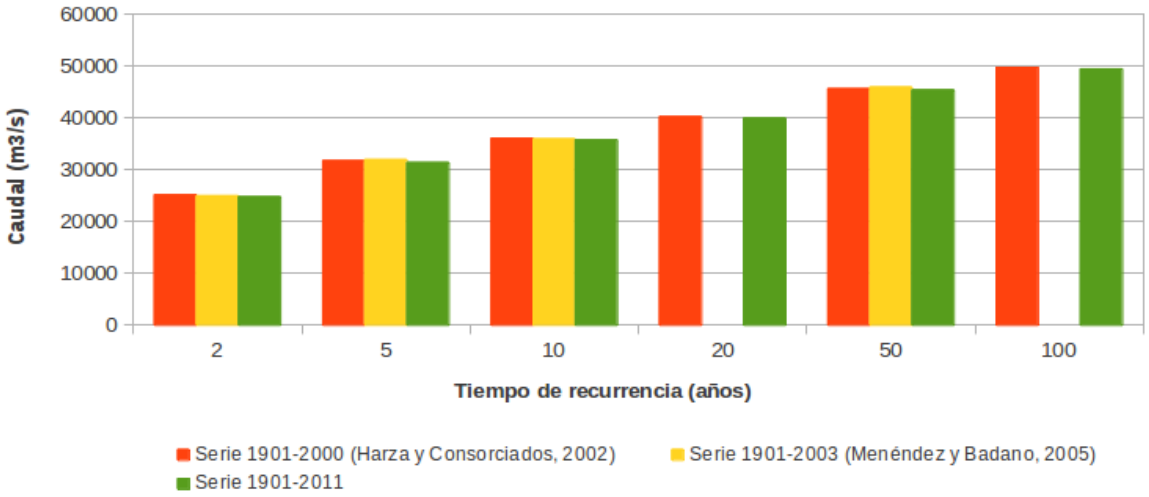


Figura 2.21. *Comparación de períodos de retorno para el río Paraná con resultados antecedentes.*

3 INFORMACIÓN TOPOBATIMÉTRICA

3.1 Topografía

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 3.1 se grafica el MDE del terreno, representado como zonas de nivel.

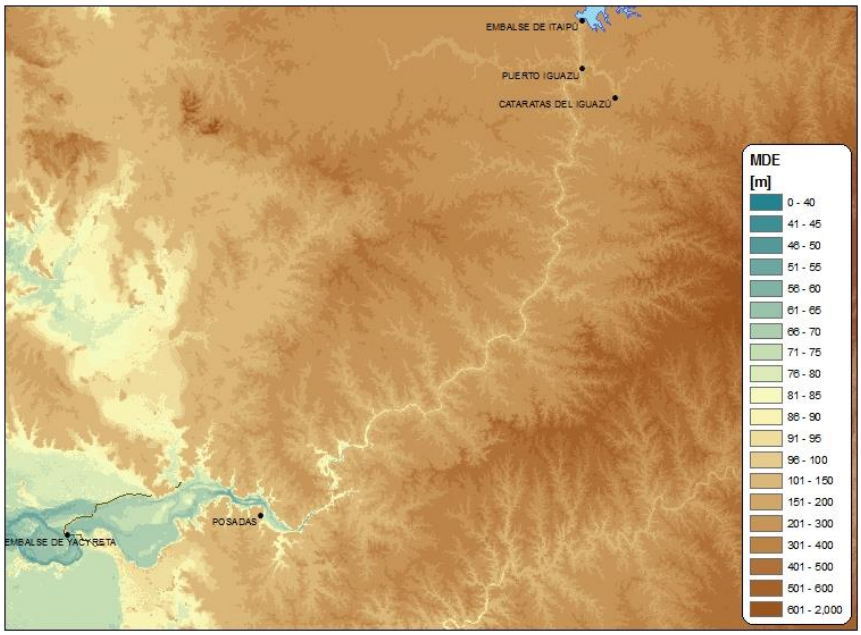


Figura 3.1. *Vista del MDE del terreno.*

3.2 Batimetría

En la Figura 3.2 se indican los tramos para los cuales se dispuso de datos batimétricos provenientes de distintas fuentes.

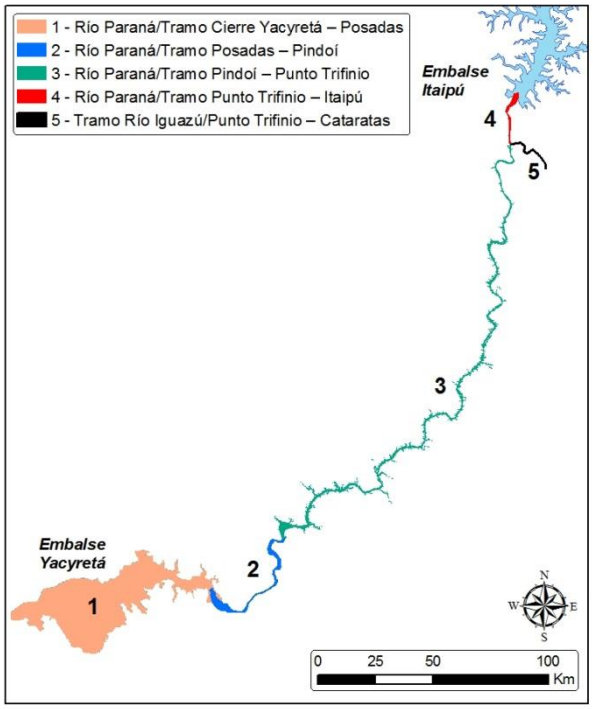


Figura 3.2. *Tramos con distintas fuentes de datos.*

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.

A continuación se indican las fuentes de datos utilizadas en cada tramo. Esta información será eventualmente actualizada en la siguiente etapa del estudio.

3.2.1 Río Paraná/Tramo Cierre Yacyretá – Posadas

El tramo se muestra en la Figura 3.3. Se combinaron dos fuentes de datos. Como base se tomó el MDE construido para la EBY durante los estudios de calidad de aguas (Alvarez Tagliabúe & Menéndez 2003), basado en todos los datos históricos disponibles (Figura 3.4). Sobre él se volcaron los datos de 31 secciones transversales relevadas por EVARSA para la EBY en el año 2004, correspondientes al sub-tramo desde San Cosme hasta Candelaria (Figura 3.5).

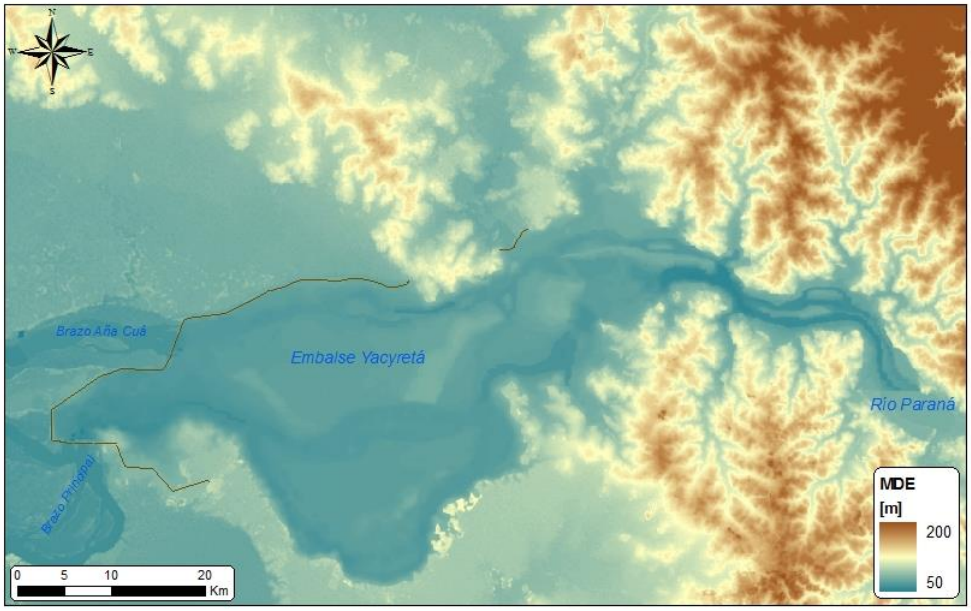


Figura 3.3. *Tramo embalse de Yacyretá.*

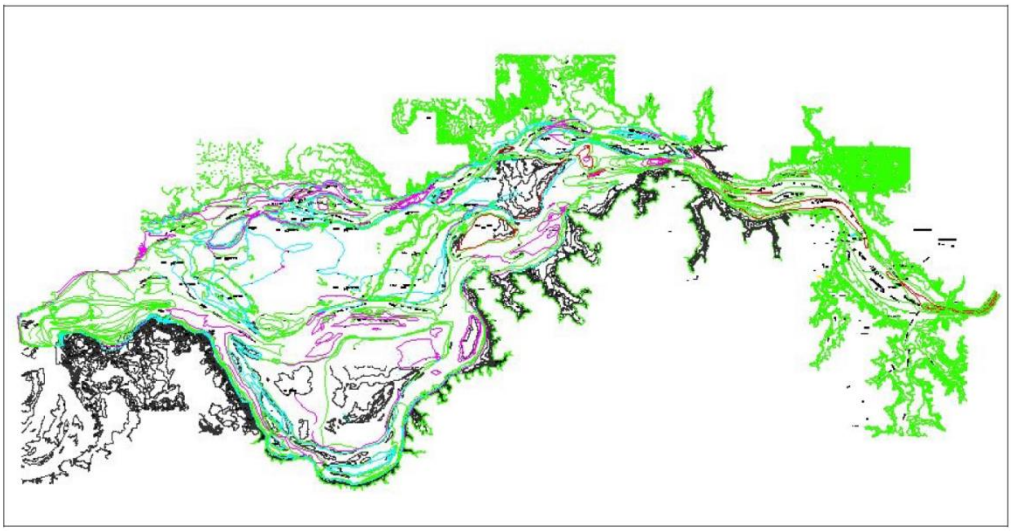


Figura 3.4. *Datos batimétricos históricos del embalse de Yacyretá.*

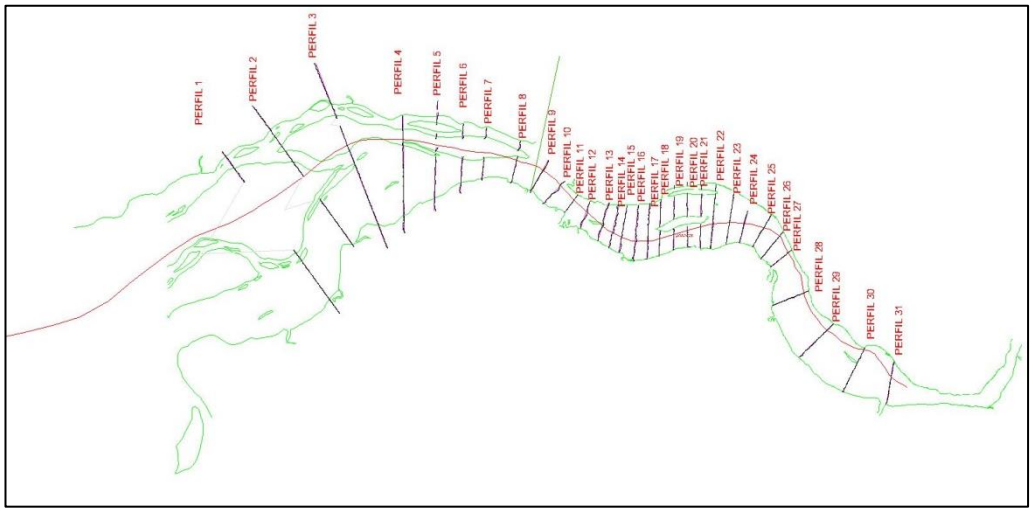


Figura 3.5. *Secciones transversales relevadas por EVARSA.*

3.2.2 Río Paraná/Tramo Posadas – Pindoí

Se utilizaron dos fuentes de datos (Figura 3.6):

- Relevamientos de secciones transversales efectuados para la COMIP entre 1970 y 1980.
- Relevamientos batimétricos en parte de esta zona llevados a cabo por el CERIDE.

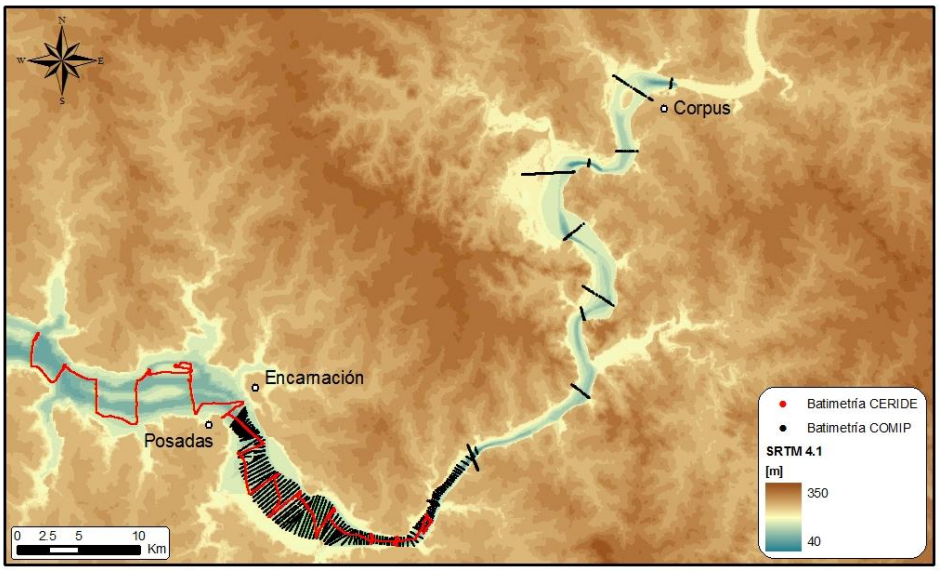


Figura 3.6. *Puntos de relevamiento para el tramo de cauce Corpus a Posadas-Encarnación.*

3.2.3 Río Paraná/Tramo Pindoí – Punto Trifinio

Se utilizaron un total de 66 secciones transversales relevadas por distintos organismos y en distintas épocas, tal como se indica en la Tabla 3.1 y la Figura 3.7. Las fuentes de información se dividen en secciones del Grupo de Trabajo Alto Paraná Argentina (GTAPA), Central Hidroeléctrica Yacyretá (CHY) y la Comisión Mixta Argentino-Paraguaya del Río Paraná (COMIP).

Tabla 3.1. *Secciones transversales del tramo Punto Trifinio – Pindoí.*

N°	Sección	Localidad	Fuente	Fecha
1	29H	Aguas Arriba Conf Garupá (move)	CHY (tesis)	-
2	30H	Candelaria	CHY (tesis)	-
3	31H	Puerto Gramajo	CHY (tesis)	-
4	32H	La Mina	CHY (tesis)	-
5	N1	Puerto San Juan	COMIP	-
6	33H	Santa Ana	CHY (tesis)	-
7	28G	Teyu Cuaré	GTAPA (tesis)	-
8	34H	Reina Victoria	CHY (tesis)	-
9	27G	Puerto San Ignacio	GTAPA (tesis)	-
10	36H	Colonia Cantera	CHY (tesis)	-
11	PI	Itacurubí	CHY (tesis)	-
12	N2	Puerto Roca	COMIP	29/01/80
13	38H	Punta Ñaro	CHY (tesis)	-
14	26G	Puerto Doce	GTAPA (tesis)	-
15	24G	Isla Pindoí	GTAPA (tesis)	-
16	23G	Puerto Remanso	GTAPA (tesis)	-
17	22G	Santo Pipó	GTAPA (tesis)	-
18	21G	Puerto Gisella	GTAPA (tesis)	-
19	N3	Puerto Nuevo	COMIP	24/01/80
20	20G	Puerto Polana	GTAPA (tesis)	-
21	20G	Puerto Leoni	GTAPA (tesis)	-
22	N4	Puerto San Gotardo	COMIP	20/01/80
23	18G	Puerto Verde	GTAPA (tesis)	-
24	N5	Puerto León	COMIP	16/01/80
25	17G	Puerto Rico	GTAPA (tesis)	-
26	N6	Puerto Garuhape	COMIP	16/01/80
27	16G	Puerto Luján	GTAPA (tesis)	-
28	N7	San Rafael	COMIP	17/01/80
29	15G	Paranay Guazu	GTAPA (tesis)	-
30	N8	Mboi-Mbusu	COMIP	11/1/1980

N°	Sección	Localidad	Fuente	Fecha
31	N9	Isla Caraguatay	COMIP	11/8/1980
32	13G	Puerto Montecarlo	GTAPA (tesis)	-
33	N10	Arroyo San Juan	COMIP	9/11/1980
34	12G	Puerto Piray	GTAPA (tesis)	-
35	SP47	Puerto El Dorado	GTAPA (tesis)	-
36	N11	Puerto Paty-Cua	COMIP	6/1/1980
37	SP46	Km 1811.3	GTAPA (tesis)	-
38	SP45	Puerto Victoria	GTAPA (tesis)	-
39	SP44	Km 1822.0	GTAPA (tesis)	-
40	N12	Isla Pareha	COMIP	22/12/79
41	N13	Puerto Yacuy-Guazu	COMIP	-
42	SP43	Aguas Arriba Conf Yacuy Guazú	GTAPA (tesis)	-
43	SP42	Puerto Mado	GTAPA (tesis)	-
44	N14	Arroyo Aguaray-Guazu	COMIP	14/12/79
45	SP40	Toro-Cua	COMIP (tesis)	-
46	N15	Arroyo Toro-Cua	COMIP	12/12/1979
47	SP38	Puerto Krieger	GTAPA (tesis)	-
48	SP37	Puerto Esperanza	GTAPA (tesis)	-
49	SP39	Yrigoyen	GTAPA (tesis)	-
50	SP36	Paranambu	GTAPA (tesis)	-
51	SP35	Km 1873.0	GTAPA (tesis)	-
52	SP34	Puerto Libertad	GTAPA (tesis)	-
53	N16	Puerto Bossetti	COMIP	11/12/1979
54	SP32	Km 1891.3	COMIP (tesis)	-
55	N17	Cancah del yasi	COMIP	11/12/1979
56	SP31	Arroyo Y-Tuti	GTAPA (tesis)	-
57	SP30	Km 1901.0	COMIP (tesis)	-
58	N19	Península Militar	COMIP	18/02/80
59	SP28	Km 1907.0	COMIP (tesis)	-
60	SP27	Km 1911.0	GTAPA (tesis)	-
61	N20	Estación Experimental	COMIP	-
62	SP26	Puerto Bertoni	COMIP (tesis)	-
63	SP25	Puerto Iguazu Viejo	GTAPA (tesis)	-
64	SP24	R11	COMIP (tesis)	-
65	SP23	R8	COMIP (tesis)	-
66	SP22	Aguas Abajo Conf Iguazu	GTAPA (tesis)	-

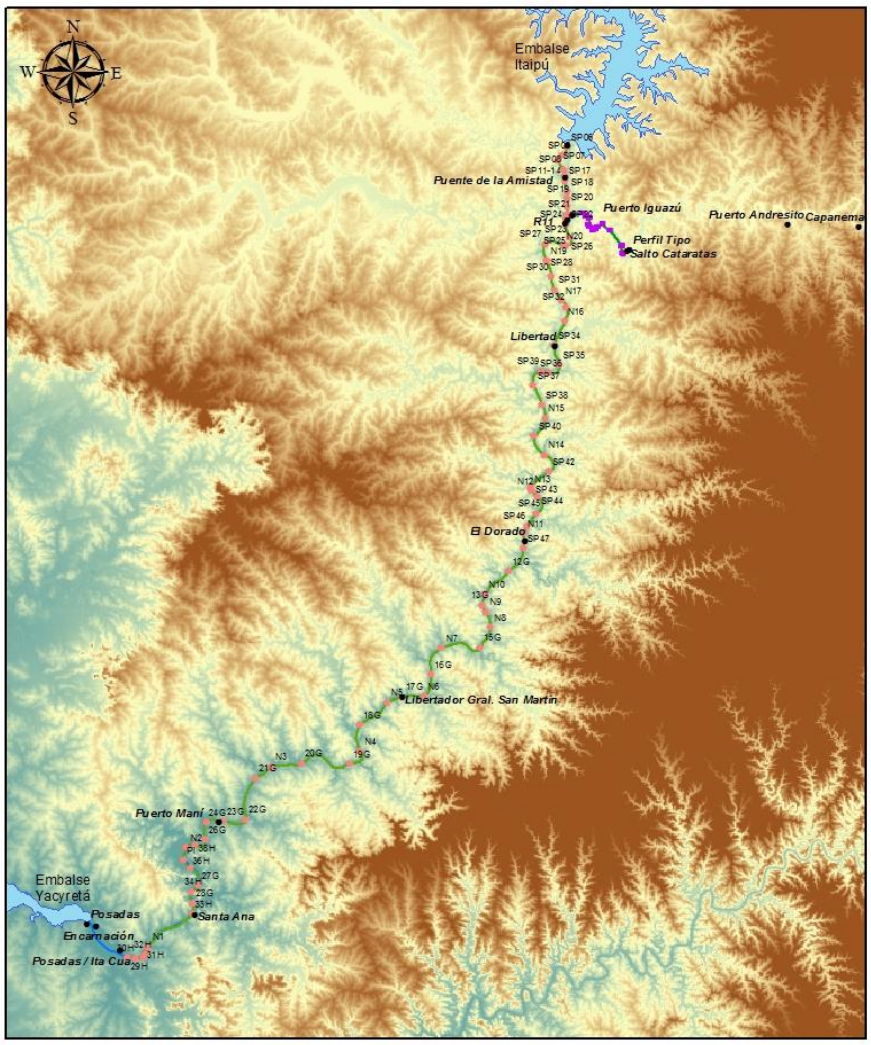


Figura 3.7. *Tramo Pindoí – Punto Trifinio.*

3.2.4 Río Paraná/Tramo Punto Trifinio – Itaipú

Se dispuso de secciones batimétricas relevadas en 1998 para el Sistema de Control Hidrometeorológico (SCH) de Itaipú (Figura 3.8).

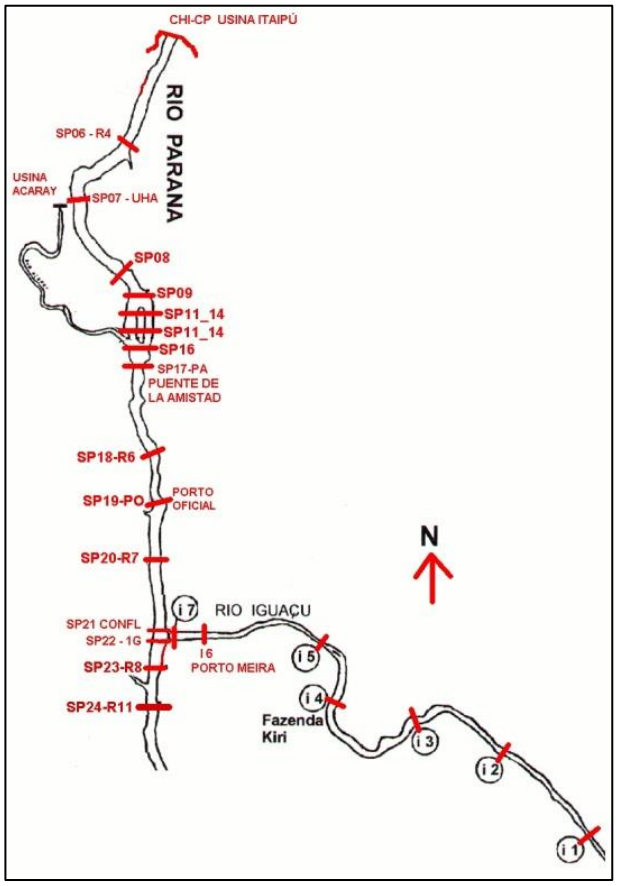


Figura 3.8. *Tramo Punto Trifinio – Itaipú.*

3.2.5 Tramo Río Iguazú/Punto Trifinio – Cataratas

Se contó con 14 perfiles transversales del río Iguazú y una traza cuasi-longitudinal relevados en diciembre 2010 para Itaipú (Figura 3.9).

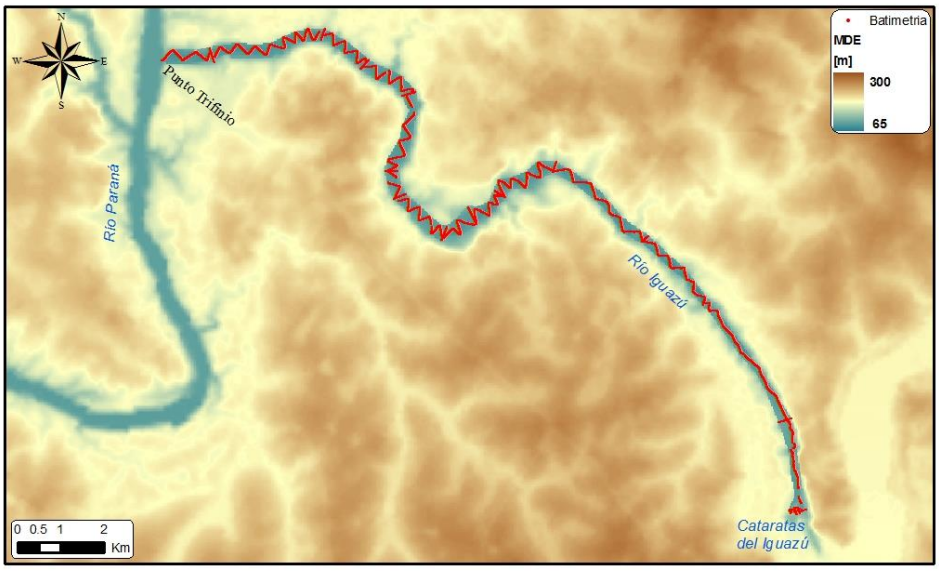


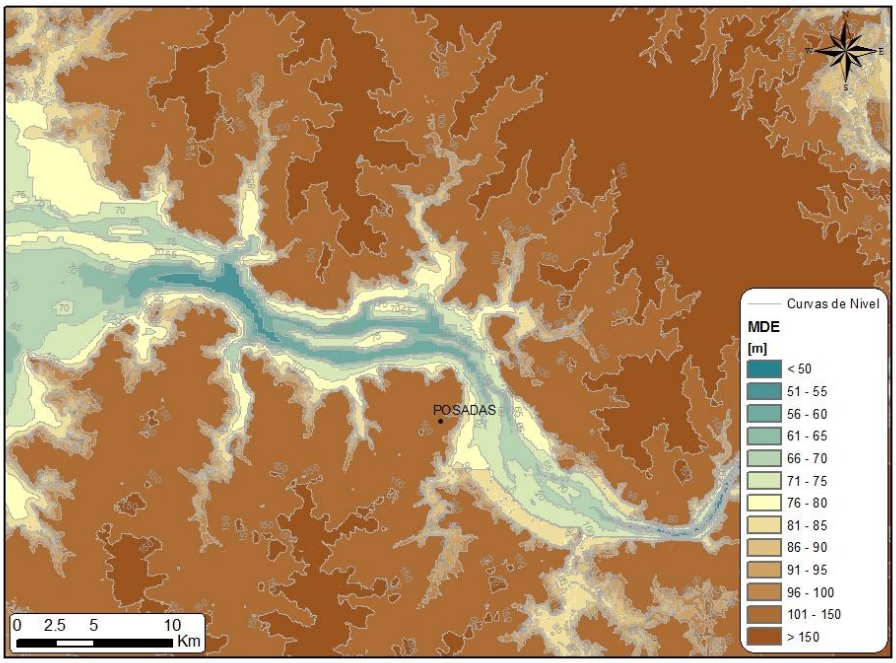
Figura 3.9. *Tramo Punto Trifinio – Cataratas.*

3.2.6 MDE del cauce

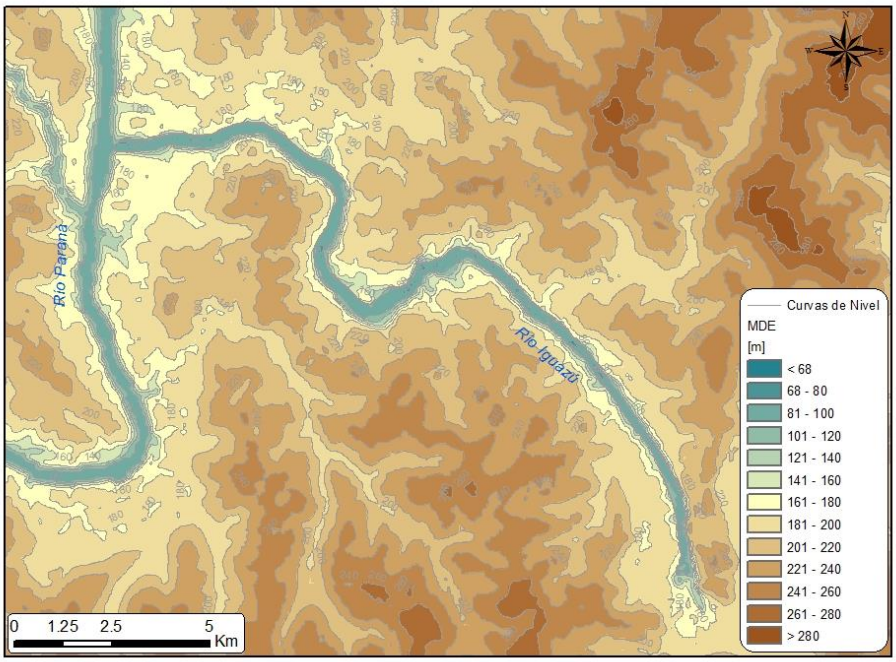
El procesamiento se efectuó por tramo. Para cada uno de ellos los datos, dispuestos en formato vectorial, se transformaron a formato TIN (Red de Triángulos Irregulares) en el cauce del río, y posteriormente fueron interpolados a una malla de celdas regulares (RASTER) de 90 metros.

3.3 MDE General

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 3.10 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 3.10. *Vistas del MDE General.*

4 MODELO HIDRODINÁMICO

4.1 Modelo preliminar

En lo que sigue se describe la implementación del modelo *MOAGAR-2*, considerado como preliminar para el presente estudio, ya que será actualizado y reajustado para obtener los resultados definitivos.

4.2 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)[1].

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.

4.3 Secciones transversales

4.3.1 Metodología de construcción

Las secciones transversales constituyen la representación geométrica discreta del espacio potencial ocupado por el agua durante el escurrimiento. En consecuencia, deben construirse cuidadosamente, de modo de representar lo más precisamente posible el volumen disponible. Esto implica tanto contar con datos de base topobatimétricos en cantidad suficiente, como seleccionar una orientación y espaciamiento adecuados para mantener

[1] http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/

controlado el error de discretización.

Una vez definida la orientación y el espaciamiento, la construcción de las secciones transversales surge de generar cortes al MDE con esas trazas. Esto se considera suficiente para una buena representación de la planicie de inundación. No obstante, la representación resultante del cauce se ha enriquecido con datos originales disponibles.

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. En particular, se producen zonas de almacenamiento en las desembocaduras de los tributarios, donde se generan efectos de remanso. 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.

Las extensiones de las tres ramas del modelo, identificadas en la Figura 2.1, son las siguientes:

i. Río Paraná/Tramo Itaipú – Punto Trifinio: 21 km.
ii. Río Iguazú/Tramo Cataratas – Punto Trifinio: 23 km.
iii. Río Paraná/Tramo Punto Trifinio – Cierre Yacyretá: 200 km.

Se efectuaron tratamientos particulares diferentes para los siguientes tramos:

A. Tramo Itaipú – Punto Trifinio.
B. Tramo Cataratas – Punto Trifinio.
C. Tramo Punto Trifinio – Pindoí.
D. Tramo Pindoí – Posadas
E. Tramo Posadas – Cierre Yacyretá.

En lo que sigue se describen esos tratamientos.

4.3.2 Tramo Itaipú – Punto Trifinio

En este tramo del Paraná Superior se utilizaron las secciones provistas por el SCH de Itaipú (Figura 3.8), las cuales fueron ingresadas al modelo sin modificaciones. Son un total de 13 secciones (Figura 4.1), con un espaciamiento medio de 2,5 km, que varía entre 1 y 4 km.

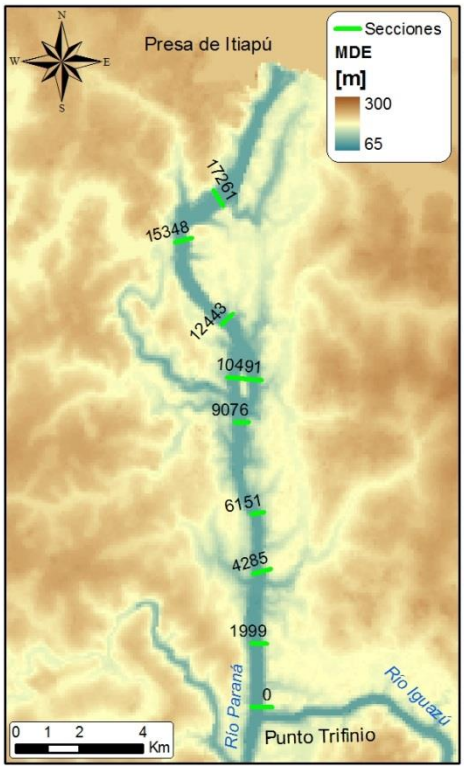
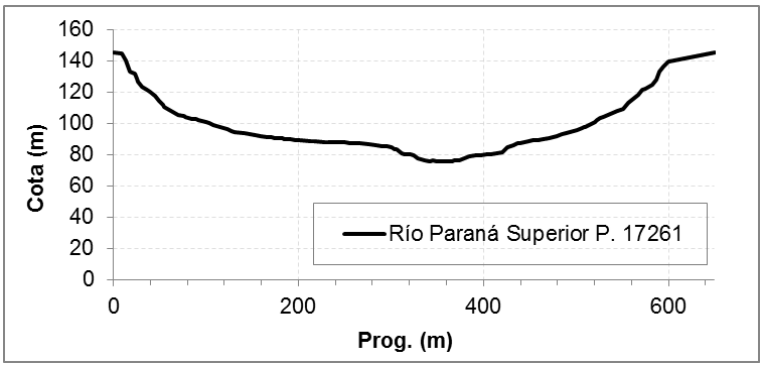
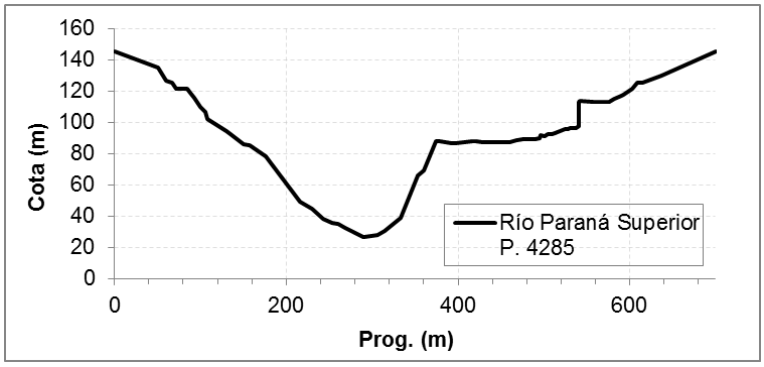


Figura 4.1. *Ubicación de secciones transversales para el tramo Itaipú - Punto Trifinio.*

Las secciones típicas son de forma trapecial o triangular, con un ancho promedio de 550 m. En la Figura 4.2 se presentan, a título ilustrativo, dos secciones del tramo.



a) 17261 m



b) 4285 m

Figura 4.2. *Perfiles de secciones transversales para el tramo Itaipú - Punto Trifinio.*

4.3.3 Tramo Cataratas - Punto Trifinio

En este tramo del río Iguazú las secciones se generaron mediante cortes transversales a la traza del río sobre el MDE. Se construyeron 51 secciones distribuidas uniformemente, con un espaciamiento entre ellas de 500 m (Figura 4.3).

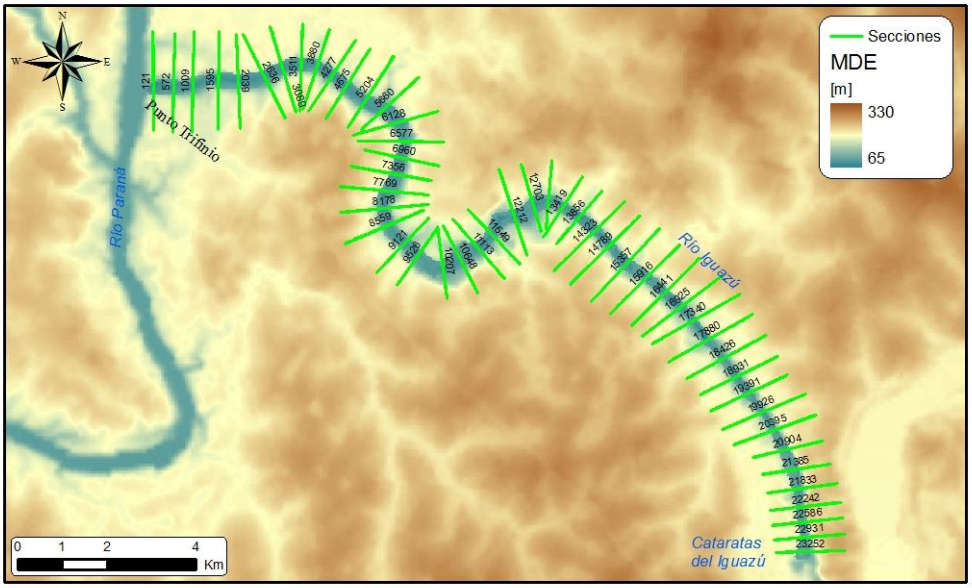
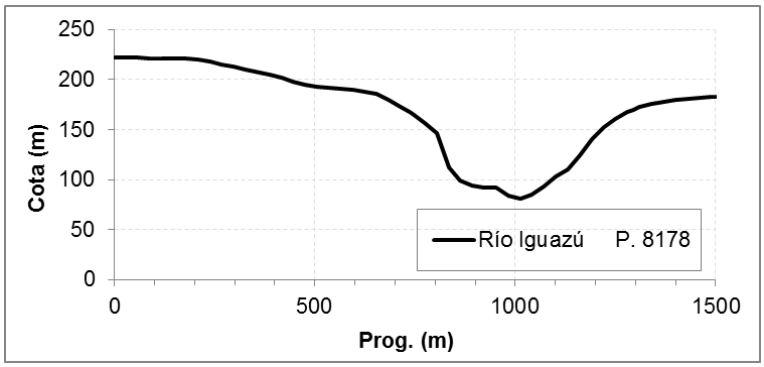
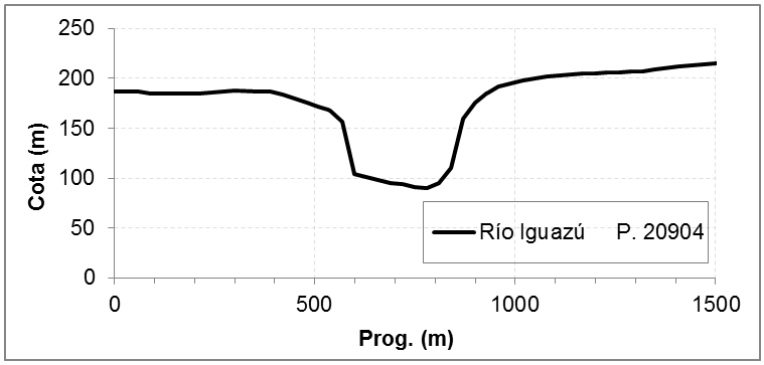


Figura 4.3. *Ubicación de secciones transversales para el tramo Cataratas - Punto Trifinio.*

Las secciones tienen forma trapecial, con un ancho de entre 150 y 500 m, y una tendencia a ampliarse a medida que se aproximan a la desembocadura en el Río Paraná. En la Figura 4.4 se muestran dos secciones del tramo.



a) 8178 m



b) 20904 m

Figura 4.4. *Perfiles de secciones transversales para el tramo Cataratas - Punto Trifinio.*

4.3.4 Tramo Punto Trifinio – Corpus

En este tramo del Alto Paraná (de 344 km de extensión) se utilizaron 66 secciones transversales relevadas por distintos organismos y en distintas épocas, tal como se indica en la Tabla 4.1, con un espaciamiento medio del orden de 5 km. Las fuentes de información se dividen en secciones del Grupo de Trabajo Alto Paraná Argentina (GTAPA), Central Hidroeléctrica Yacyretá (CHY) y la Comisión Mixta Argentino-Paraguaya del Río Paraná (COMIP). El total de secciones empleadas fue de 66 (Figura 4.5), resultando un espaciamiento medio de 5,1 km. Durante la implementación se eliminaron tres secciones que generaban inestabilidades en el modelo y que resultaban inconsistentes con sus vecinas, a saber, SP23 (R8) y PI (Itacurabí), que indicaban áreas transversales mucho mayores, y 20G (Puerto Polana), que indicaba áreas mucho menores.

Tabla 4.1. *Secciones transversales del tramo Punto Trifinio-Corpus.*

N°	Sección	Localidad	Fuente	Fecha
1	29H	Aguas Arriba Conf Garupá (move)	CHY (tesis)	-
2	30H	Candelaria	CHY (tesis)	-
3	31H	Puerto Gramajo	CHY (tesis)	-
4	32H	La Mina	CHY (tesis)	-
5	N1	Puerto San Juan	COMIP	-
6	33H	Santa Ana	CHY (tesis)	-
7	28G	Teyu Cuaré	GTAPA (tesis)	-
8	34H	Reina Victoria	CHY (tesis)	-
9	27G	Puerto San Ignacio	GTAPA (tesis)	-
10	36H	Colonia Cantera	CHY (tesis)	-
11	PI	Itacurubí	CHY (tesis)	-
12	N2	Puerto Roca	COMIP	29/01/80
13	38H	Punta Ñaro	CHY (tesis)	-
14	26G	Puerto Doce	GTAPA (tesis)	-
15	24G	Isla Pindoí	GTAPA (tesis)	-
16	23G	Puerto Remanso	GTAPA (tesis)	-
17	22G	Santo Pipó	GTAPA (tesis)	-
18	21G	Puerto Gisella	GTAPA (tesis)	-
19	N3	Puerto Nuevo	COMIP	24/01/80
20	20G	Puerto Polana	GTAPA (tesis)	-
21	20G	Puerto Leoni	GTAPA (tesis)	-
22	N4	Puerto San Gotardo	COMIP	20/01/80
23	18G	Puerto Verde	GTAPA (tesis)	-
24	N5	Puerto León	COMIP	16/01/80
25	17G	Puerto Rico	GTAPA (tesis)	-
26	N6	Puerto Garuhape	COMIP	16/01/80
27	16G	Puerto Luján	GTAPA (tesis)	-
28	N7	San Rafael	COMIP	17/01/80
29	15G	Paranay Guazu	GTAPA (tesis)	-
30	N8	Mboi-Mbusu	COMIP	11/1/1980
31	N9	Isla Caraguatay	COMIP	11/8/1980
32	13G	Puerto Montecarlo	GTAPA (tesis)	-
33	N10	Arroyo San Juan	COMIP	9/11/1980
34	12G	Puerto Piray	GTAPA (tesis)	-
35	SP47	Puerto El Dorado	GTAPA (tesis)	-

N°	Sección	Localidad	Fuente	Fecha
36	N11	Puerto Paty-Cua	COMIP	6/1/1980
37	SP46	Km 1811.3	GTAPA (tesis)	-
38	SP45	Puerto Victoria	GTAPA (tesis)	-
39	SP44	Km 1822.0	GTAPA (tesis)	-
40	N12	Isla Pareha	COMIP	22/12/79
41	N13	Puerto Yacuy-Guazu	COMIP	-
42	SP43	Aguas Arriba Conf Yacuy Guazú	GTAPA (tesis)	-
43	SP42	Puerto Mado	GTAPA (tesis)	-
44	N14	Arroyo Aguaray-Guazu	COMIP	14/12/79
45	SP40	Toro-Cua	COMIP (tesis)	-
46	N15	Arroyo Toro-Cua	COMIP	12/12/1979
47	SP38	Puerto Krieger	GTAPA (tesis)	-
48	SP37	Puerto Esperanza	GTAPA (tesis)	-
49	SP39	Yrigoyen	GTAPA (tesis)	-
50	SP36	Paranambu	GTAPA (tesis)	-
51	SP35	Km 1873.0	GTAPA (tesis)	-
52	SP34	Puerto Libertad	GTAPA (tesis)	-
53	N16	Puerto Bossetti	COMIP	11/12/1979
54	SP32	Km 1891.3	COMIP (tesis)	-
55	N17	Cancah del yasi	COMIP	11/12/1979
56	SP31	Arroyo Y-Tuti	GTAPA (tesis)	-
57	SP30	Km 1901.0	COMIP (tesis)	-
58	N19	Península Militar	COMIP	18/02/80
59	SP28	Km 1907.0	COMIP (tesis)	-
60	SP27	Km 1911.0	GTAPA (tesis)	-
61	N20	Estación Experimental	COMIP	-
62	SP26	Puerto Bertoni	COMIP (tesis)	-
63	SP25	Puerto Iguazu Viejo	GTAPA (tesis)	-
64	SP24	R11	COMIP (tesis)	-
65	SP23	R8	COMIP (tesis)	-
66	SP22	Aguas Abajo Conf Iguazu	GTAPA (tesis)	-

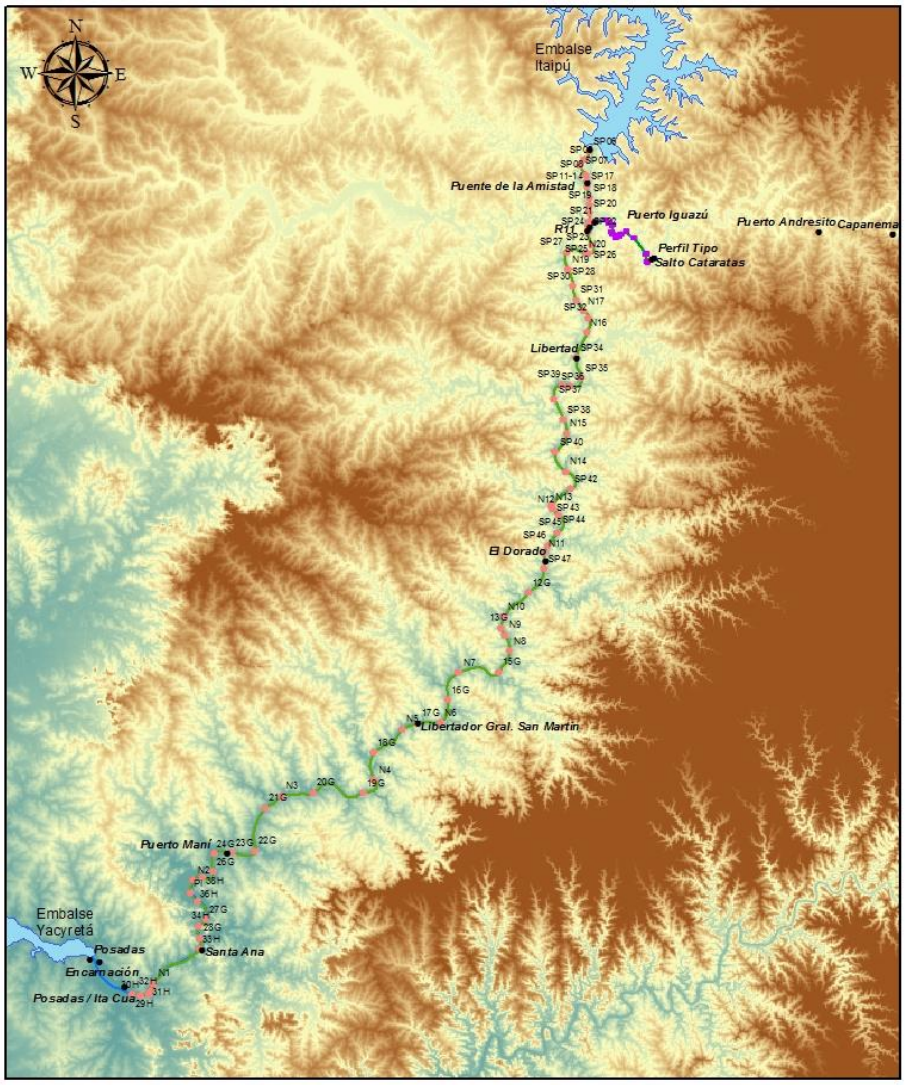
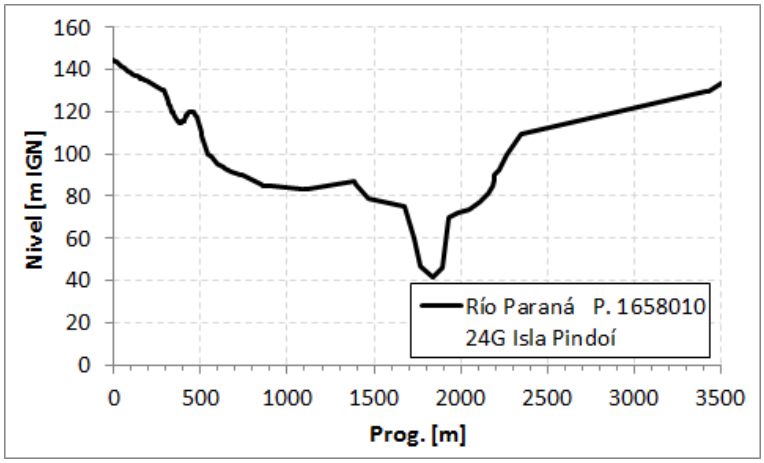
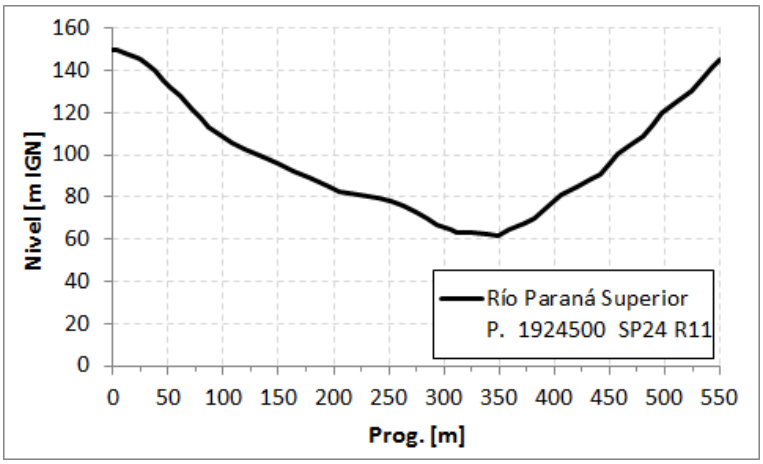


Figura 4.5. *Ubicación de secciones transversales para el tramo Punto Trifinio - Corpus.*

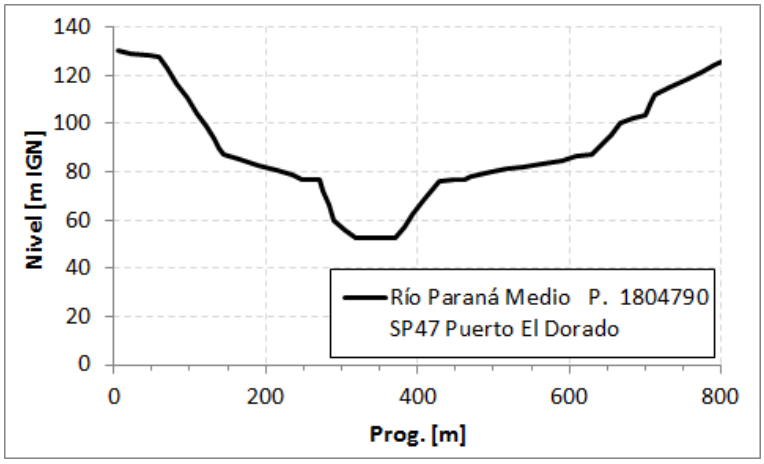
En la Figura 4.6 se presentan tres secciones típicas del tramo.



a) 24G Isla Pindoí – Prog. 1658010 m



b) SP47 Puerto El Dorado – Prog. 1804790 m



c) 1924500 m

Figura 4.6. *Perfiles de secciones transversales para el tramo Punto Trifinio - Corpus.*

4.3.5 Tramo Corpus - Posadas

En este tramo del Alto Paraná las secciones se construyeron mediante cortes transversales a la traza del río sobre el MDE. El total de secciones es de 30, con un espaciamiento medio entre ellas de 2 km (Figura 4.7).

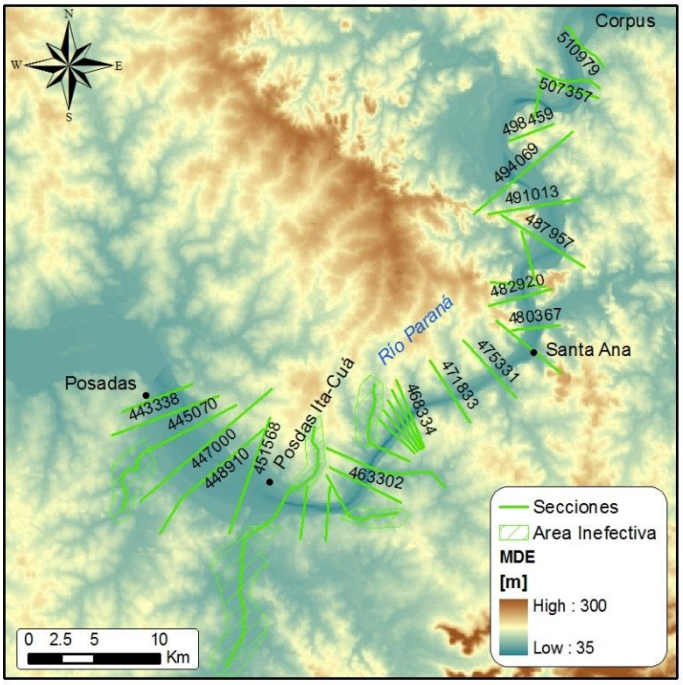
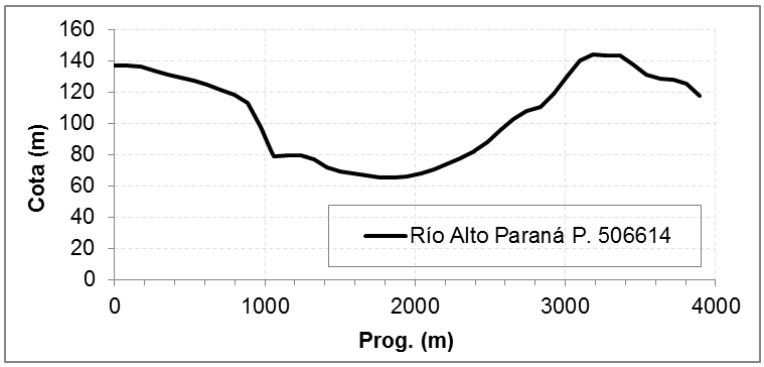
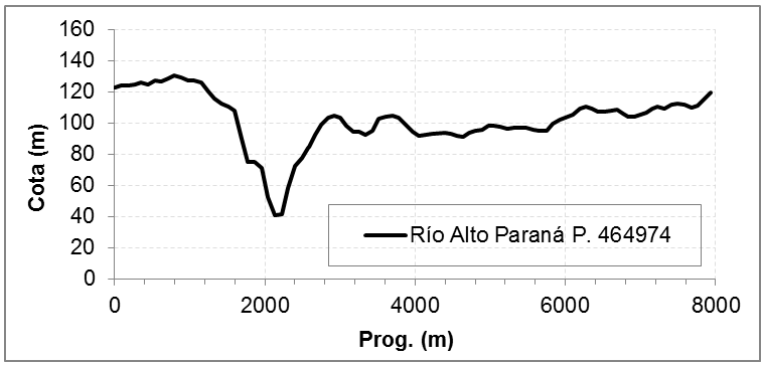


Figura 4.7. *Ubicación de secciones transversales para el tramo Corpus - Posadas.*

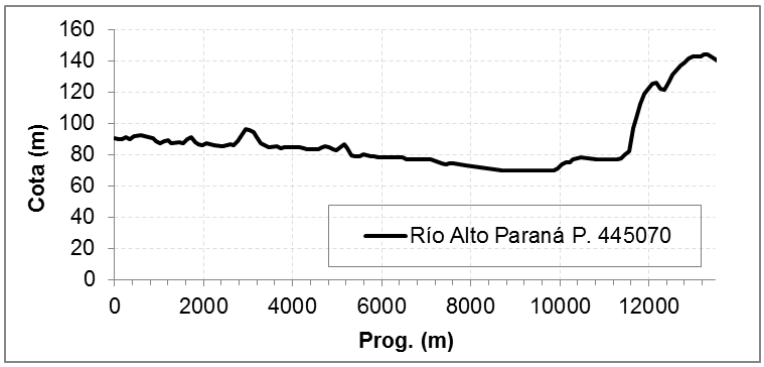
La forma de las secciones sufre modificaciones a lo largo del tramo: las primeras son similares a las del tramo anterior (Punto Trifinio - Corpus), mientras que, al acercarse a Posadas, el ancho aumenta desde 1000 hasta más de 3000 m. En la Figura 4.8 se muestran tres secciones del tramo.



a) 506614 m



b) 464974 m



c) 445070 m

Figura 4.8. *Perfiles de secciones transversales para el tramo Corpus-Posadas.*

4.3.6 Tramo Embalse Yacyretá

Para la construcción de las secciones del Embalse de Yacyretá se efectuaron cortes transversales al MDE. Las secciones transversales se extienden, sobre margen derecha, hasta la presa (Figura 4.9). Hacia el final del tramo, las secciones fueron reorientadas para tender a hacerse paralelas a la central, siguiendo la dirección principal del flujo. Se identificaron como *áreas inefectivas* a las partes de las secciones que ingresan en los arroyos de margen derecha, aguas arriba del A° Aguapey.

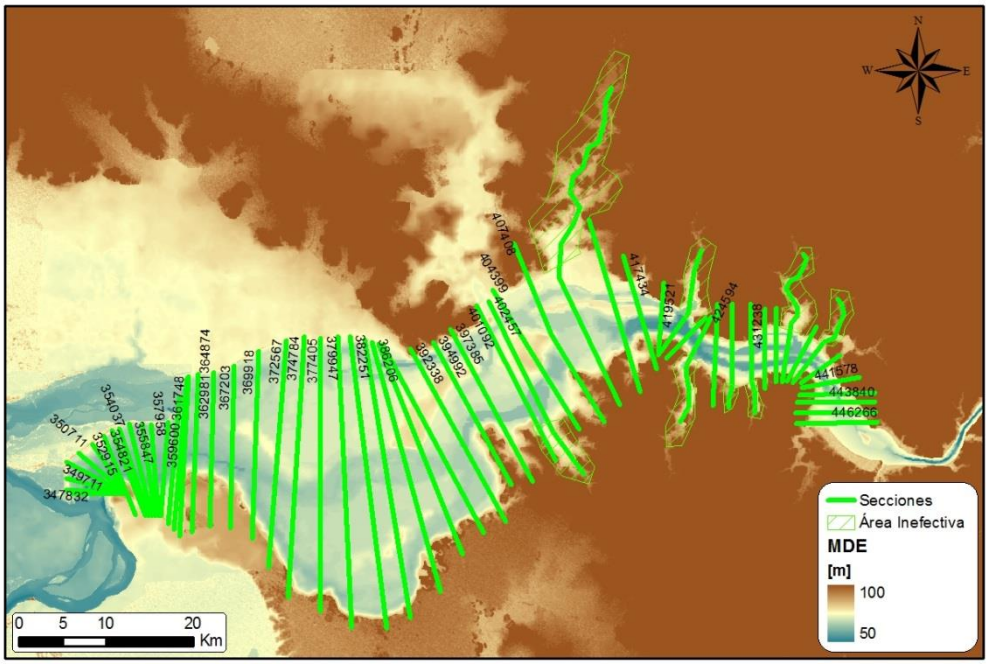
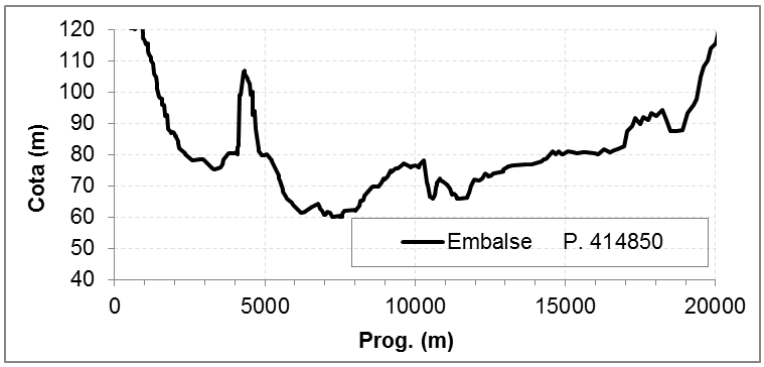
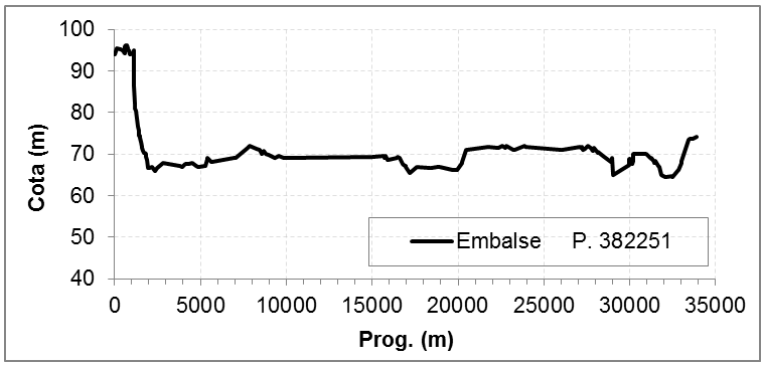


Figura 4.9. *Ubicación de secciones transversales para el tramo Embalse Yacyretá.*

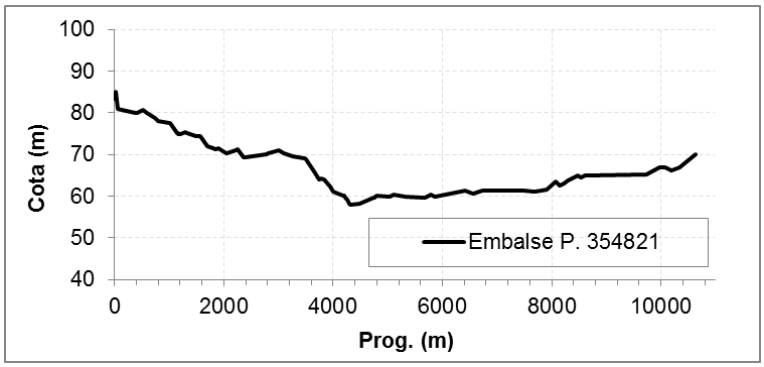
En la Figura 4.10 se presentan dos secciones típicas de este tramo.



a) 414850 m



b) 382251 m



c) 354821 m

Figura 4.10. *Perfiles de secciones transversales para el tramo Embalse Yacyretá.*

4.4 Condiciones de borde y aportes laterales

Las condiciones de borde son las siguientes:

- Serie de caudales en Itaipú.
- Serie de caudales en Cataratas.
- Serie de niveles en la central Yacyretá.

No se tienen en cuenta aportes laterales, es decir, se consideraron poco relevantes.

4.5 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.

Tanto los valores de base como los factores multiplicativos fueron ajustados durante la calibración.

4.6 Calibración

4.6.1 Escenarios

Se distinguieron dos escenarios:

- *Etapa previa al llenado del embalse de Yacyretá:* se empleó la ventana de tiempo enero/1983 – julio/1994.
- *Etapa con el embalse a cota definitiva:* se empleó la ventana de tiempo abril/2011 – octubre/2013.

Esto se llevó a cabo porque se comprobó que, debido al efecto de remanso una vez que el embalse se encuentra a cota definitiva, la rugosidad resultaba menor que para la situación previa al llenado.

4.6.2 Estaciones de comparación

La calibración de un modelo consiste en el ajuste de valores de algunos parámetros, de modo de lograr el mejor acuerdo posible entre los resultados del modelo y las mediciones. Los resultados a comparar son las series de niveles de agua en las estaciones hidrométricas interiores al modelo.

Para la etapa previa al llenado del embalse se utilizaron los registros de niveles de agua en las estaciones hidrométricas Puente de la Amistad, Puerto Iguazú, R11, El Dorado, Libertador Gral. San Martín, Santa Ana y Posadas-Ita Cuá. Además, se contó con registros en 12 estaciones 'secundarias', en el sentido de que muchas tienen ceros inciertos, presentan datos aislados erróneos, y la extensión de las series es incompleta e irregular. Estas últimas fueron utilizadas, entonces, para la verificación del modelo. Todas las estaciones se representan en la Figura 4.11.



Figura 4.11. *Ubicación de estaciones de calibración (rojo), verificación (negro) y de borde (verde) del modelo MOAGAR para la etapa previa al llenado.*

Para la etapa con el embalse a cota definitiva las estaciones de calibración fueron Puerto Iguazú, El Dorado, Libertador Gral. San Martín, Puerto Maní y Santa Ana.

4.6.3 Indicadores de bondad de ajuste

Para evaluar la performance del modelo respecto de las observaciones de nivel en cada estación hidrométrica, se eligieron cuatro indicadores de bondad de ajuste que proveen medidas del grado de acercamiento de los valores simulados respecto de los observados, a saber:

- Diferencia de valores medios (*MED*):

$$MED = \overline{H_{SIM}} - \overline{H_{OBS}}$$

donde $\overline{H_{SIM}}$ y $\overline{H_{OBS}}$ indican los valores medios de las series simulada y observada. *MED* es una medida del corrimiento sistemático del nivel calculado respecto del observado. Un valor nulo indica ausencia de corrimiento.

- Raíz del Error Cuadrático Medio (*RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(H_{SIM_i} - H_{OBS_i}\right)^2}$$

donde H_{SIM_i} y H_{OBS_i} indican los valores simulados y observados, respectivamente, y *n* es la cantidad de valores de la serie. El *RMSE* es una medida de la diferencia absoluta media, es decir, de las desviaciones locales. Su rango comienza en 0, siendo éste el valor que indica ajuste perfecto.

- Coeficiente de Determinación (R^2):

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(H_{SIM_i} - \overline{H_{SIM}}\right)\left(H_{OBS_i} - \overline{H_{OBS}}\right)\right]^2}{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(H_{SIM_i} - \overline{H_{SIM}}\right)^2\right]\left[\sum_{i=1}^{n}\left(H_{OBS_i} - \overline{H_{OBS}}\right)^2\right]}$$

Este coeficiente (que es el cuadrado del coeficiente de correlación) es la relación entre la covarianza de los valores observados y los simulados, y sus respectivas varianzas. Representa la fracción de señal observada explicada por el modelo. Su rango de variación es entre 0 y 1; $R^2 = 1$ significa un ajuste perfecto, mientras que $R^2 = 0$ indica que el modelo no es representativo.

- Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (*NSE*)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(H_{OBS_i} - H_{SIM_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(H_{OBS_i} - \overline{H_{OBS}}\right)^2}$$

Este indicador relaciona la diferencia entre valores observados y simulados con la varianza de los valores simulados (Nash y Sutcliffe, 1970). Toma valores en el rango [-∞;1]: *NSE* = 1 representa un ajuste perfecto, y *NSE* < 0 indica que el error del modelo es del mismo orden de magnitud, o mayor, que la varianza de los datos observados, por lo que la media de los datos observados tendrá una capacidad predictiva similar a la del modelo.

4.6.4 Escenario previo al llenado

La Tabla 4.2 y la Figura 4.12 muestran los valores de base del coeficiente de Manning del cauce para los tres tramos, a saber, Iguazú, Paraná Superior y Alto Paraná, el último subdividido en 6 subtramos que se extienden entre las escalas hidrométricas, donde cada subtramo lleva el nombre de la estación de aguas arriba. Las funciones de corrección para altos caudales adoptadas para los distintos tramos se muestran en la Figura 4.13.

Tabla 4.2. *Valores de base del coeficientes de rugosidad de Manning del cauce por tramo para etapa previa al llenado.*

Tramo		**Manning**
Paraná Medio	Ag Ab Posadas Ita Cuá	0,038
	Ag Ab Santa Ana	0,038
	Ag Ab Libertador Gral. San Martín	0,037
	Ag Ab El Dorado	0,037
	Ag Ab Libertad	0,037
	Ag Ab Punto Trifinio	0,037
Paraná Superior		0,042
Iguazú		0,040

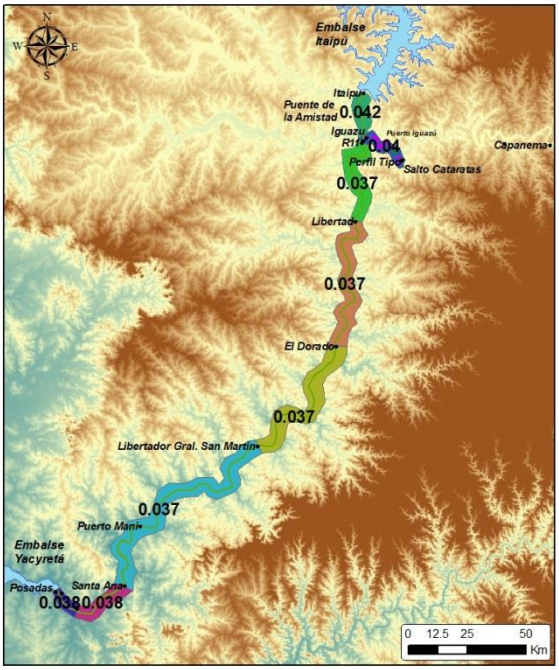


Figura 4.12. *Valores de base del coeficiente de Manning del cauce para etapa previa al llenado.*

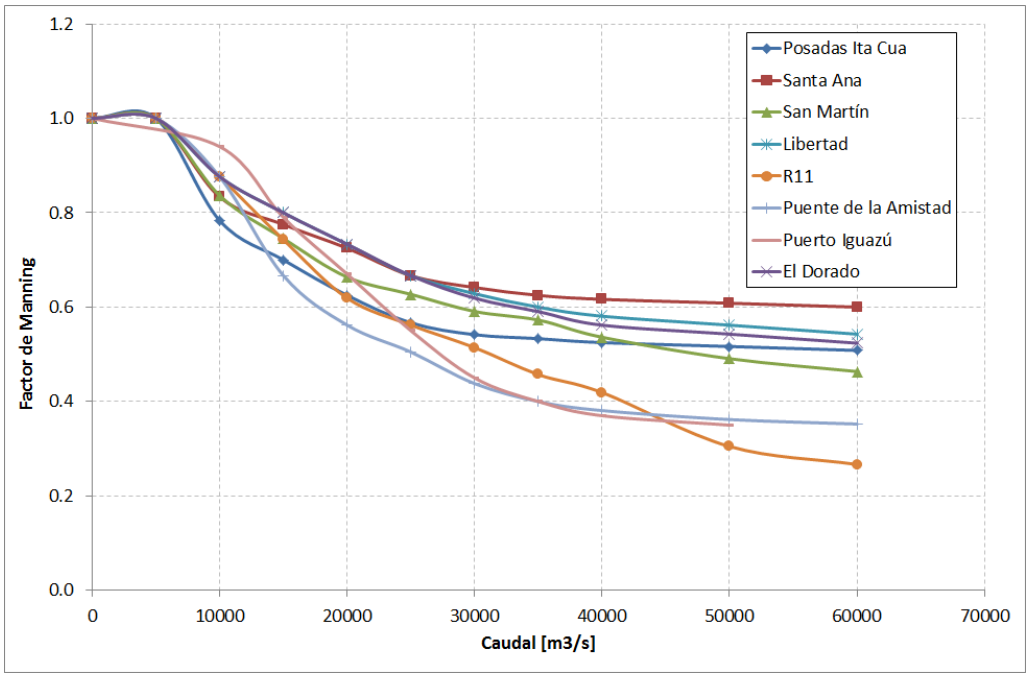
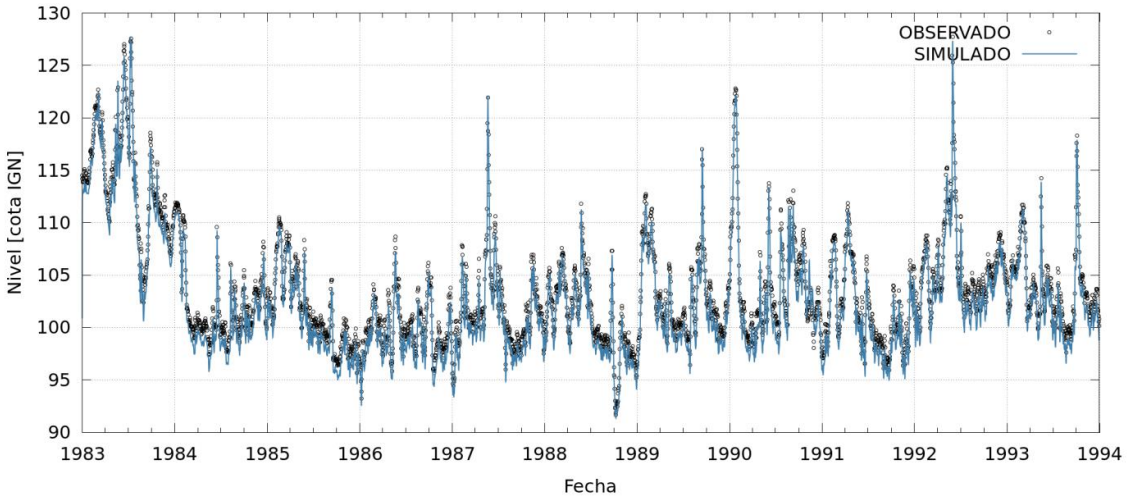
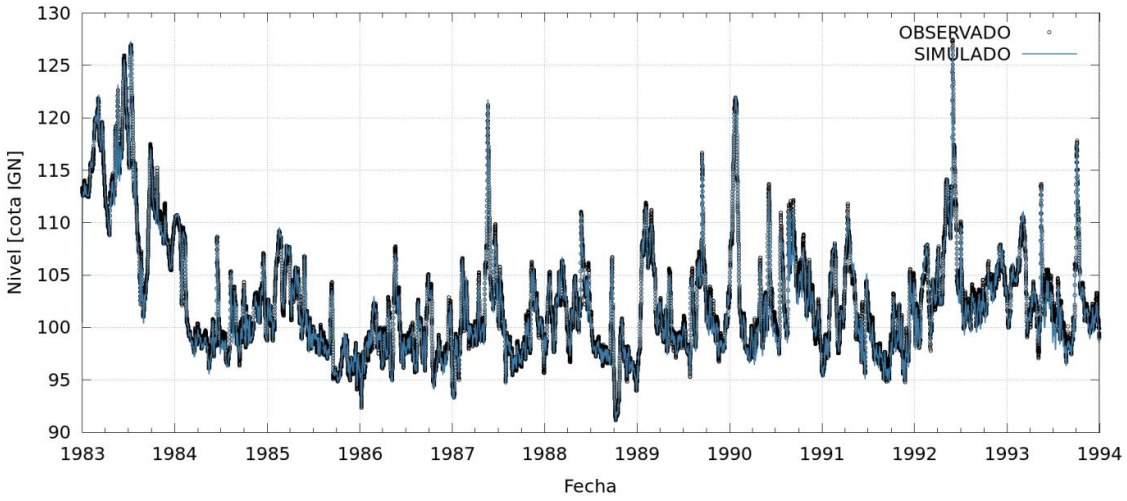


Figura 4.13. *Función de corrección del coeficiente de rugosidad de Manning en función del caudal para distintos tramos entre estaciones hidrométricas.*

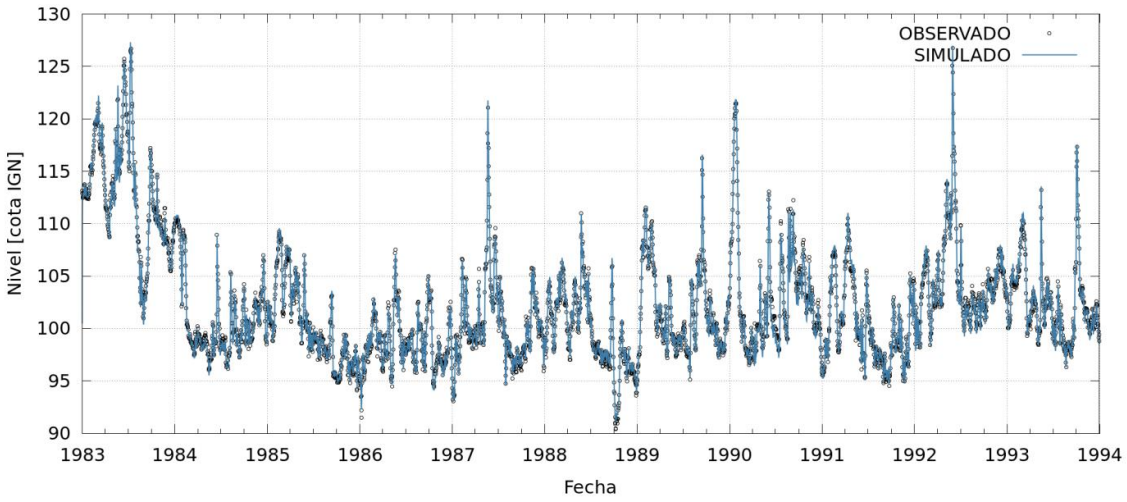
La Figura 4.14 presenta la comparación entre observaciones y simulación luego de la calibración. Se observa un acuerdo muy satisfactorio para todas las estaciones. Esto se refleja en los indicadores de bondad de ajuste, mostrados en la Tabla 4.3.



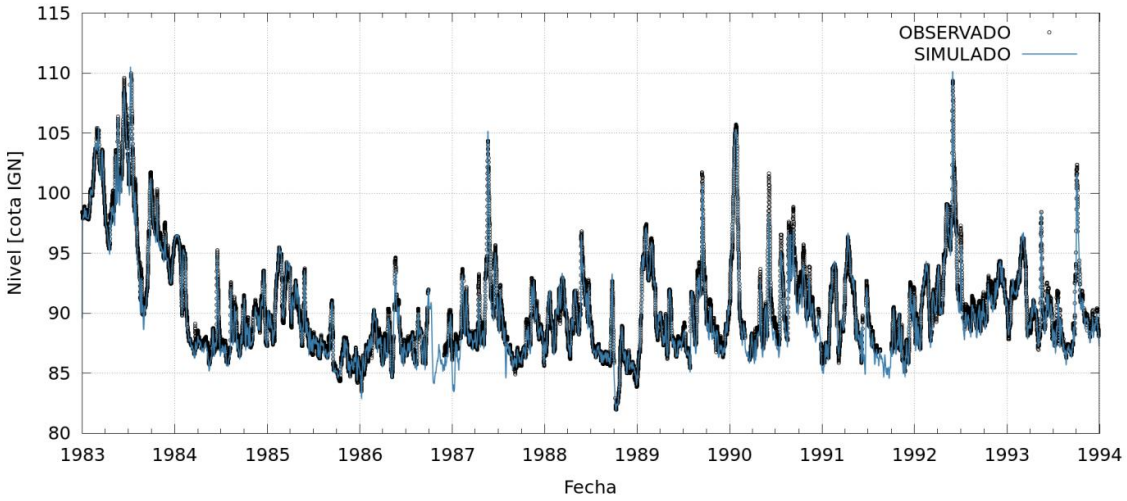
a) *Puente de la Amistad*



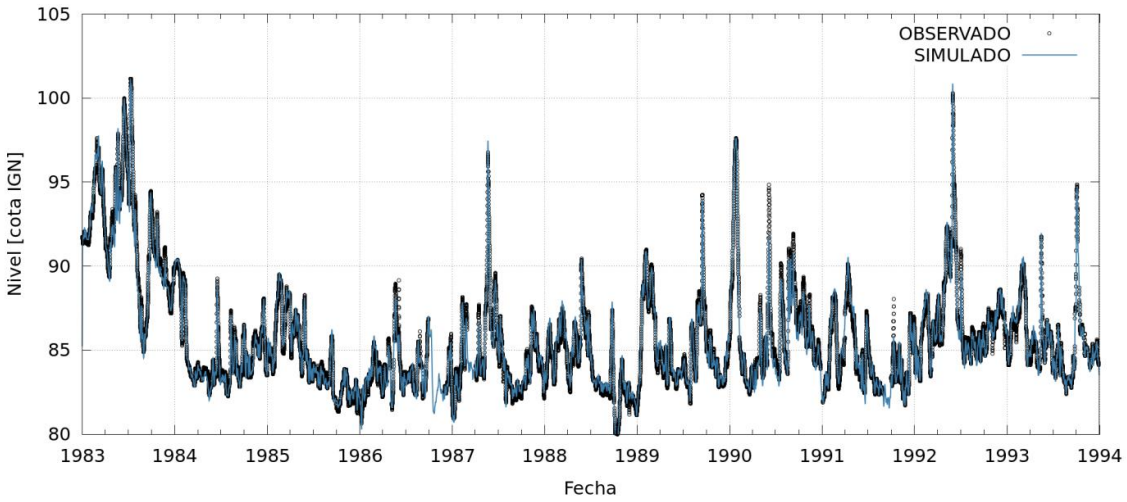
b) *Puerto Iguazú*



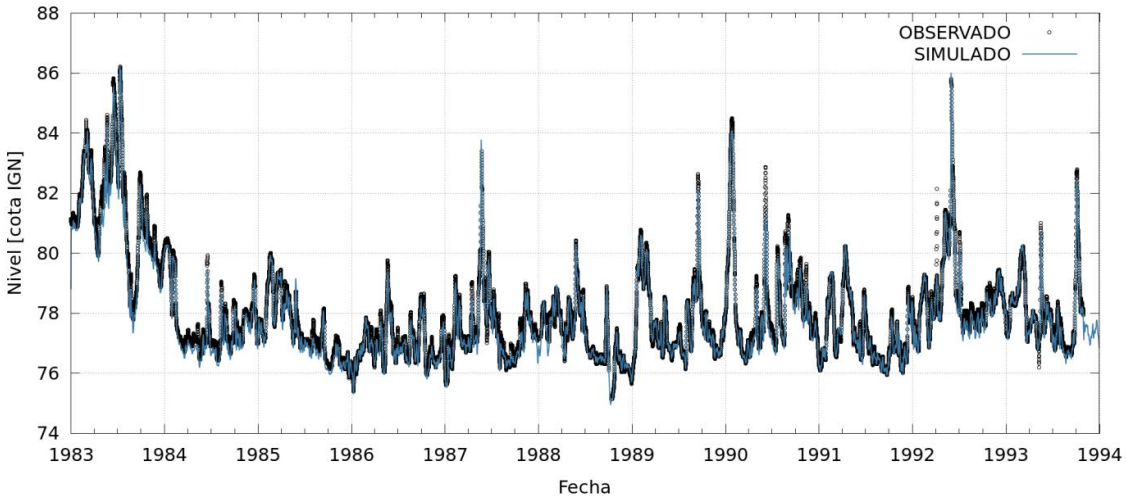
c) *R11*



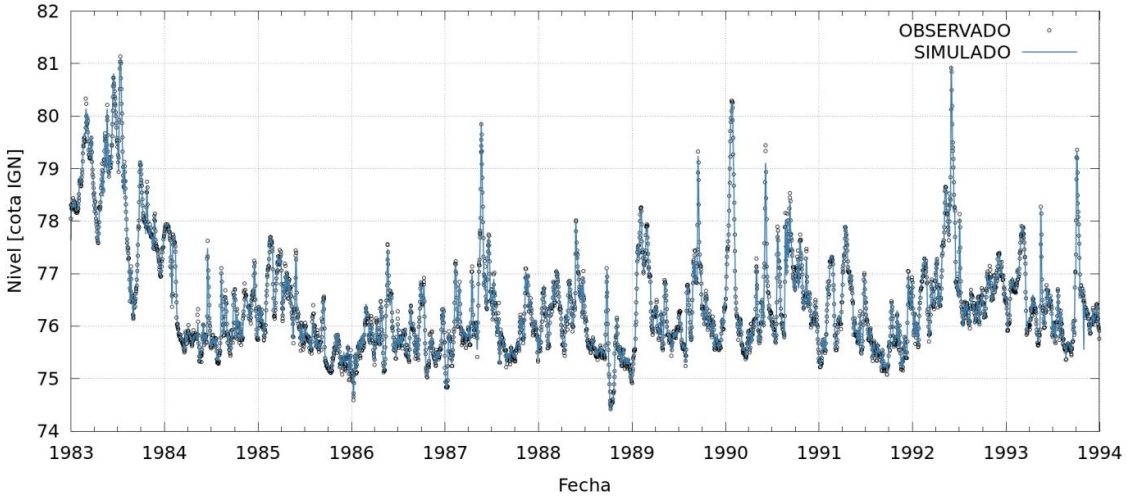
d) *El Dorado*



e) *Libertador Gral. San Martín*



f) *Santa Ana*



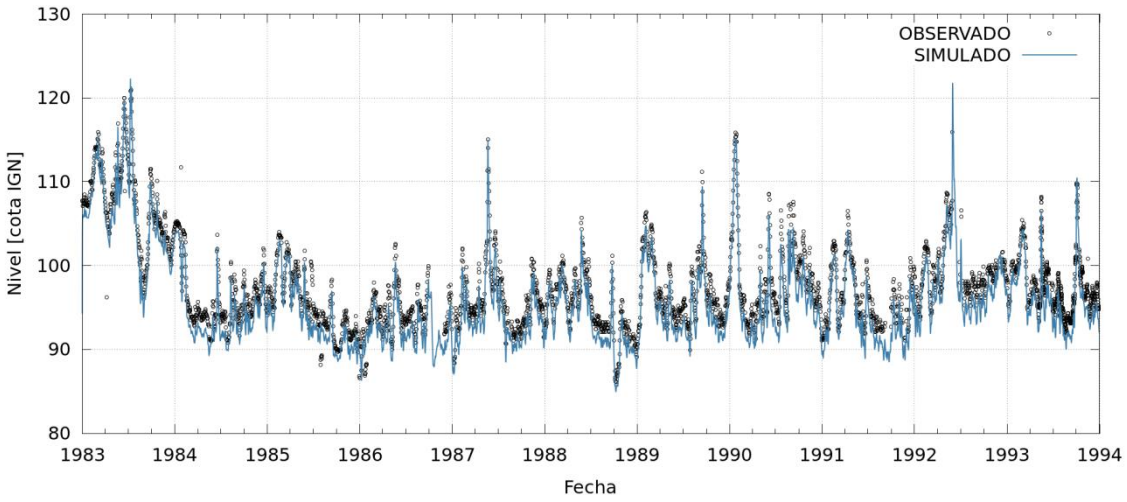
g) *Posadas Ita Cuá*

Figura 4.14. *Comparación entre niveles simulados y observados para etapa previa al llenado en estaciones de calibración.*

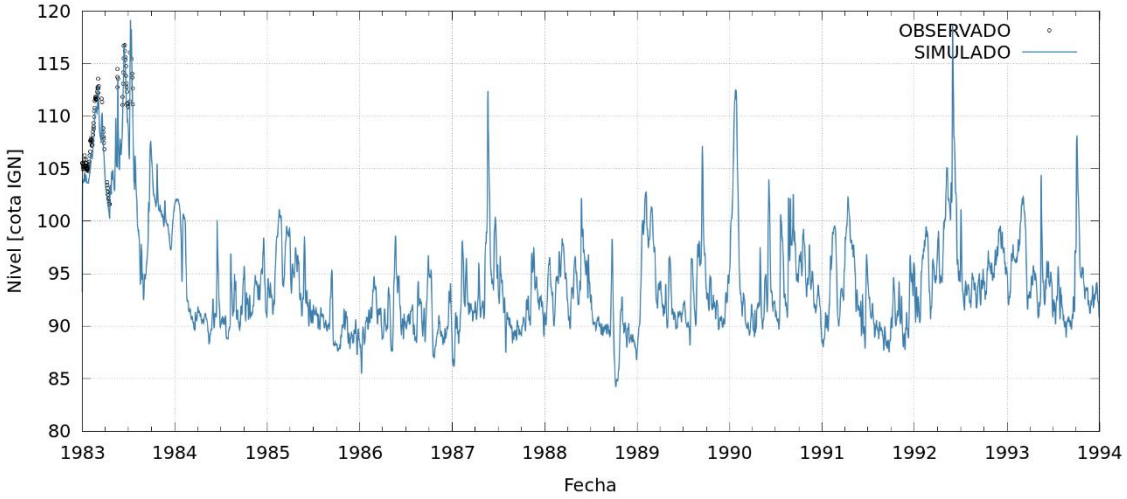
Tabla 4.3. *Indicadores de bondad de ajuste para etapa previa al llenado.*

Estación	*MED* (m)	*RMSE* (m)	R^2	*NSE*
Puerto Iguazú	0,21	0,45	0,99	0,99
Puente de la Amistad	0,06	0,39	0,99	0,96
R11	0,01	0,18	0,99	0,99
El Dorado	-0,27	0,47	0,98	0,97
Libertador Gral. San Martín	0,02	0,22	0,98	0,98
Santa Ana	0,15	0,09	0,98	0,97
Posadas Ita Cuá	0,00	0,00	0,99	0,99

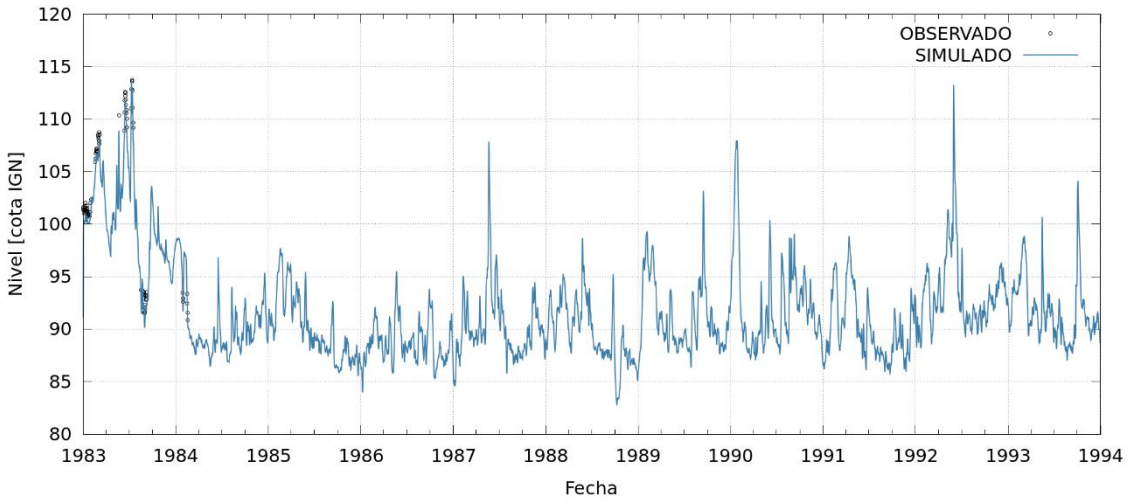
La Figura 4.15 muestra los resultados de la verificación. Se observa un acuerdo general muy satisfactorio, a pesar de algunas desviaciones que se atribuyen mayormente a limitaciones en la calidad de estos datos o en los ceros de sus estaciones.



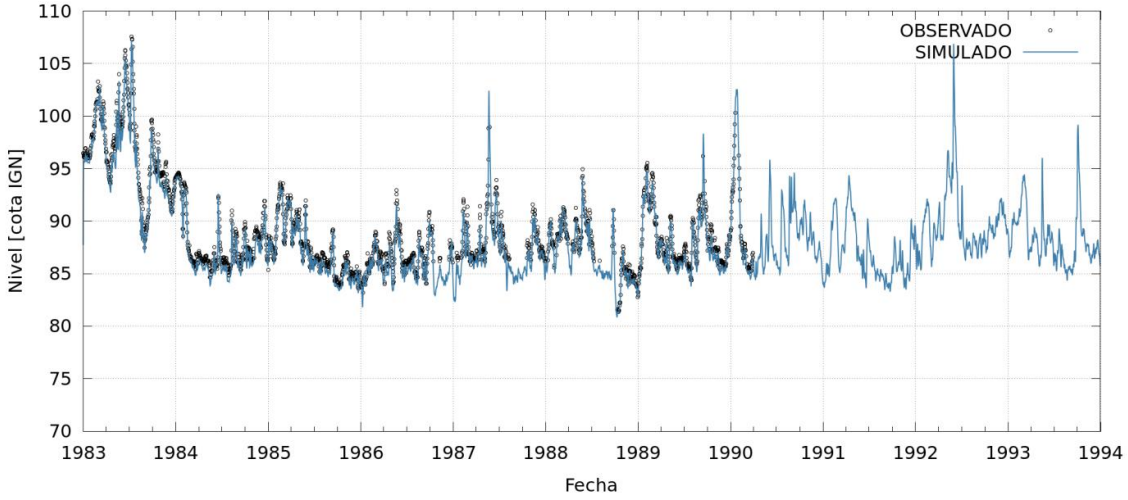
a) *Libertad*



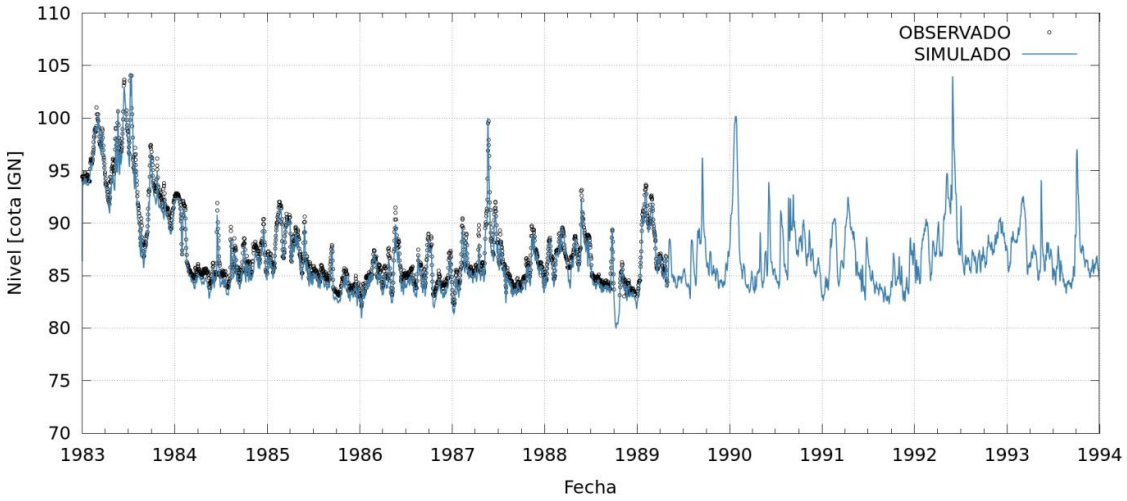
b) *Ita Pyte*



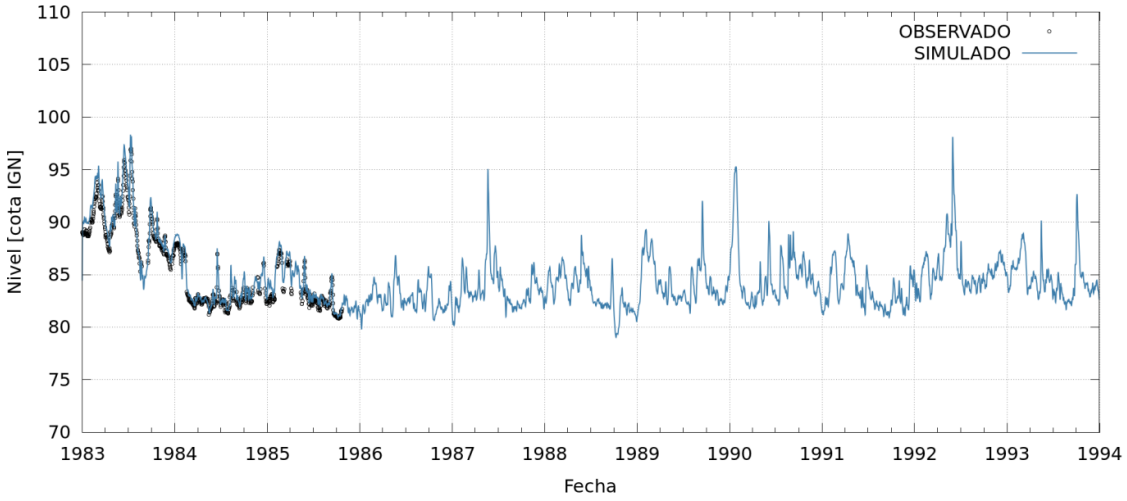
c) *Lomas Valentinas*



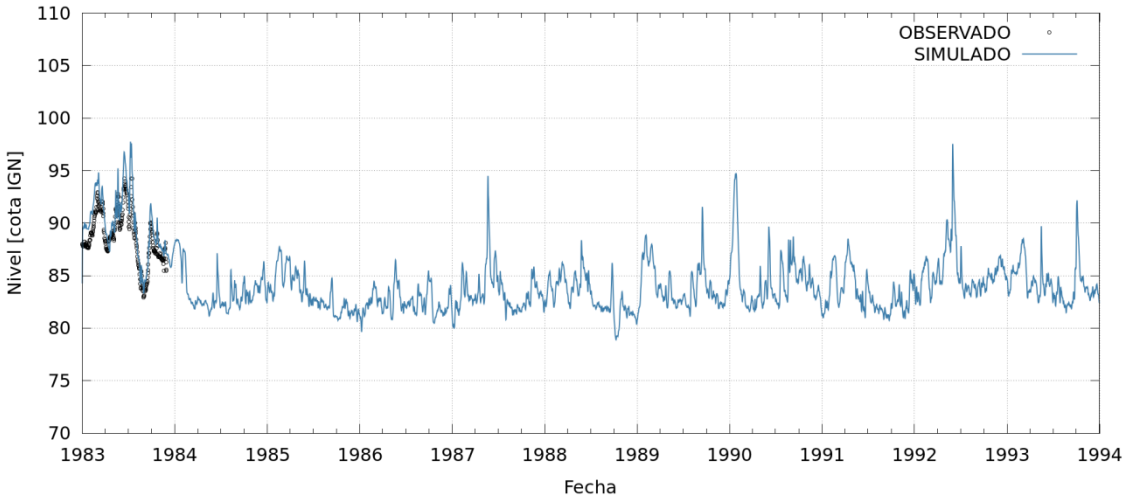
d) *Montecarlo*



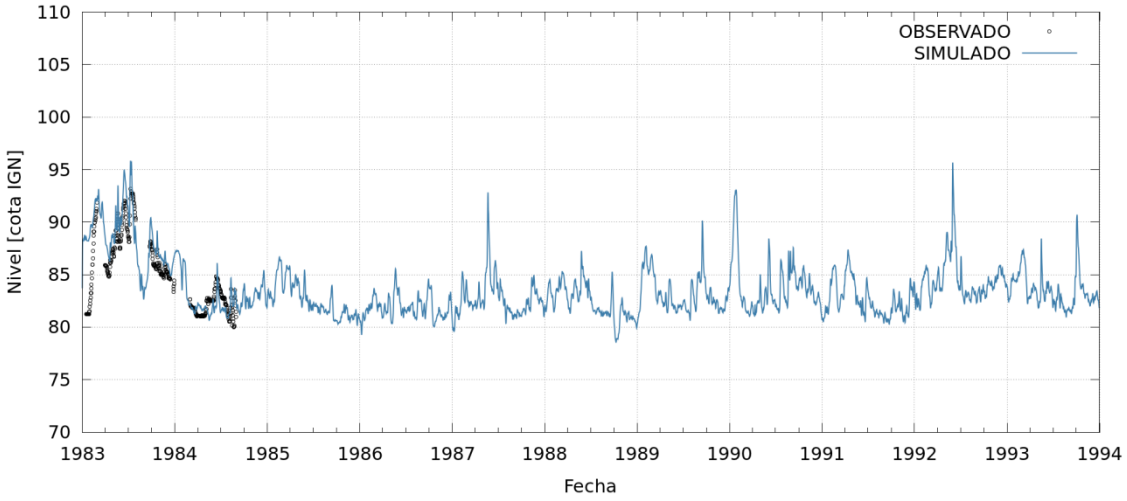
e) *San Rafael*



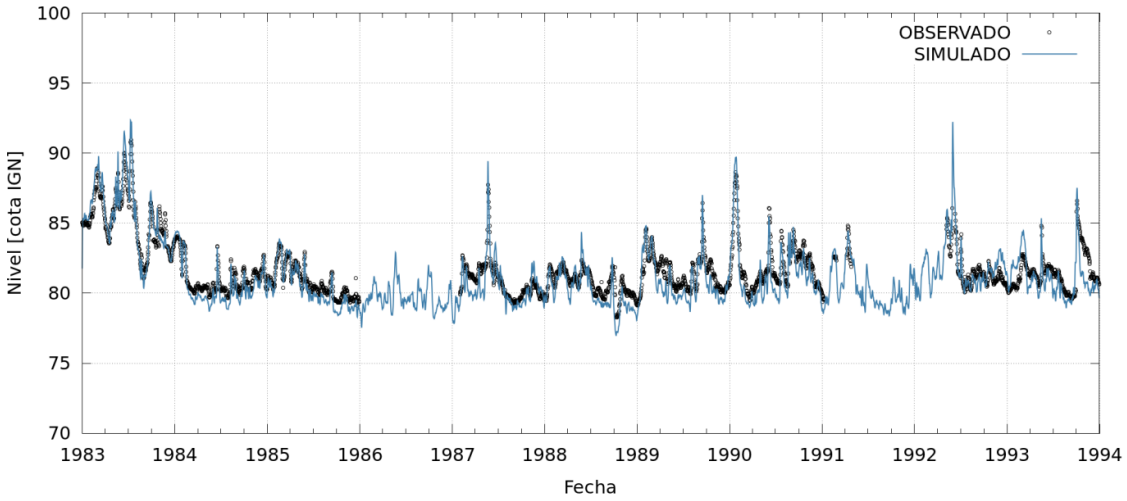
f) *Pto. Mineral*



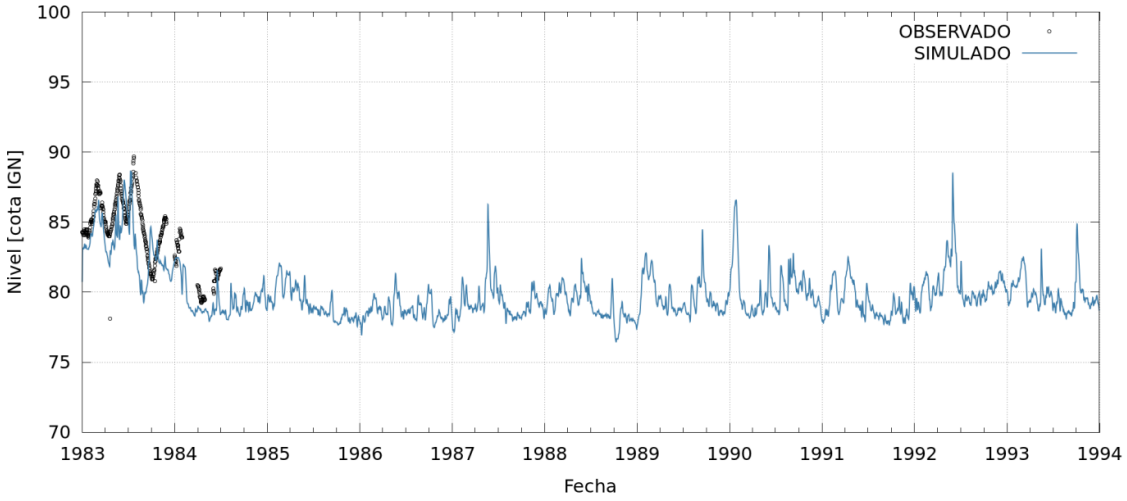
g) *Capitán Meza*



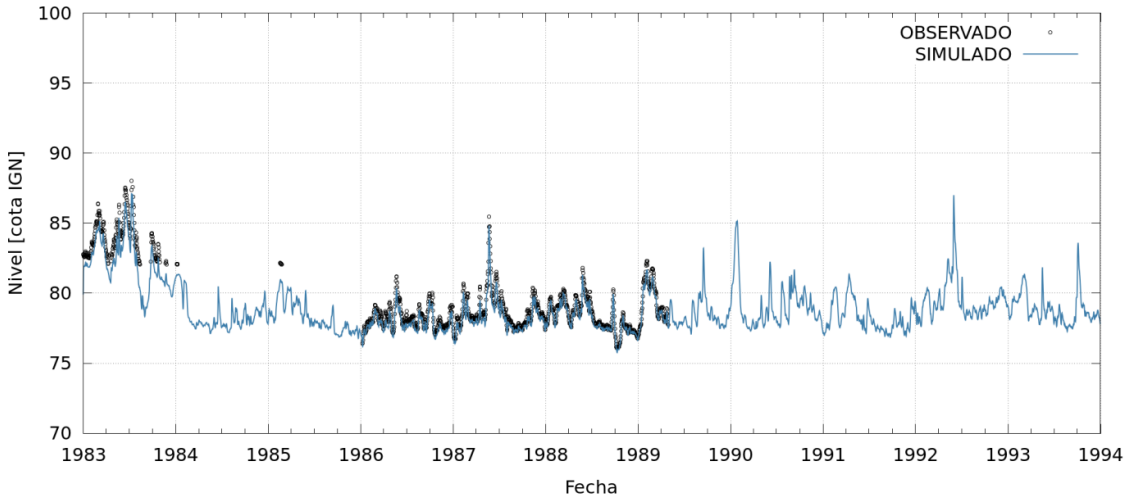
h) *Pto. Gisela*



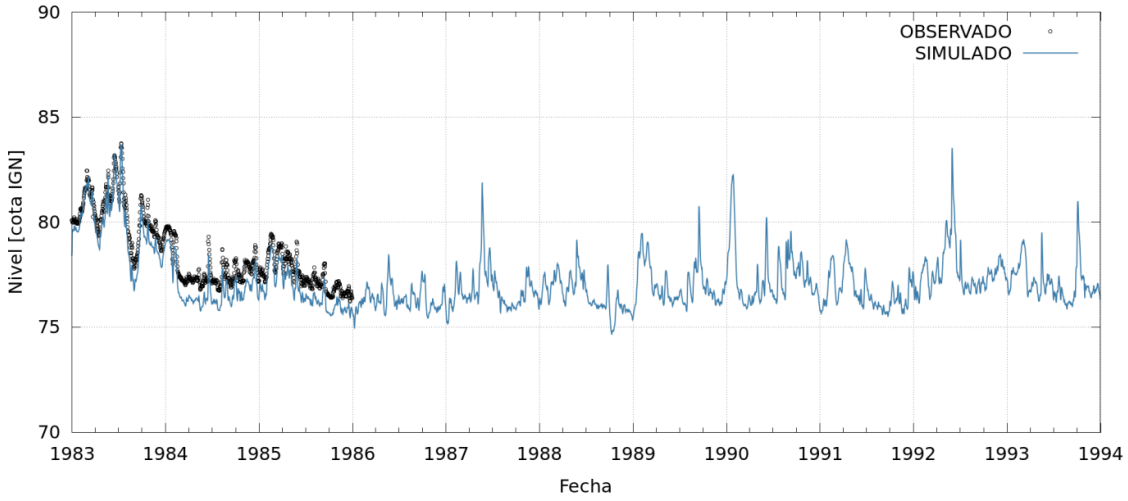
i) *Corpus*



j) *Pto. Doce*



k) *Colonia Cantera*



l) *La Mina*

Figura 4.15. *Comparación entre niveles simulados y observados para etapa previa al llenado en estaciones de verificación.*

4.6.5 Escenario a cota definitiva

Los valores ajustados del coeficiente de Manning de base del cauce se presentan en la Tabla 4.4 y la Figura 4.16, mientras que la Figura 4.17 muestra las funciones de corrección para altos caudales.

Tabla 4.4. *Coeficientes de rugosidad de Manning por tramo para etapa a cota definitiva.*

Tramo		Manning
Paraná Medio	Ag Ab Posadas Ita Cuá	0,019
	Ag Ab Santa Aná	0,019
	Ag Ab Libertador Gral. San Martín	0,032
	Ag Ab El Dorado	0,034
	Ag Ab Libertad	0,034
	Ag Ab Punto Trifinio	0,034
Paraná Superior		0,042
Iguazú		0,040

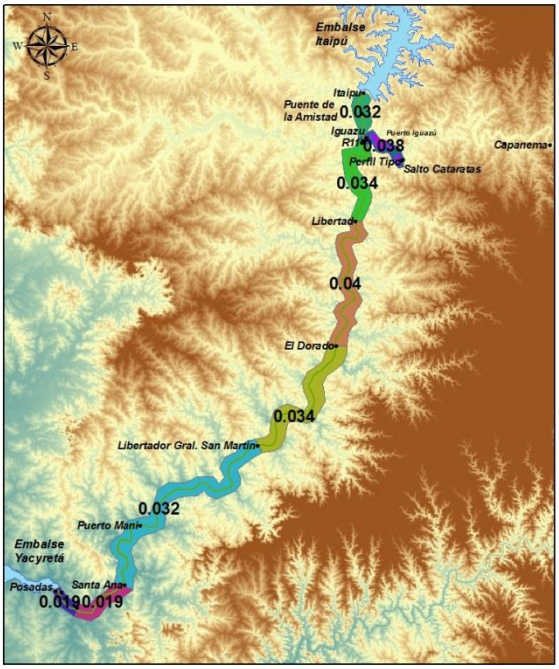


Figura 4.16. *Valores de base del coeficiente de Manning del cauce para etapa a cota definitiva.*

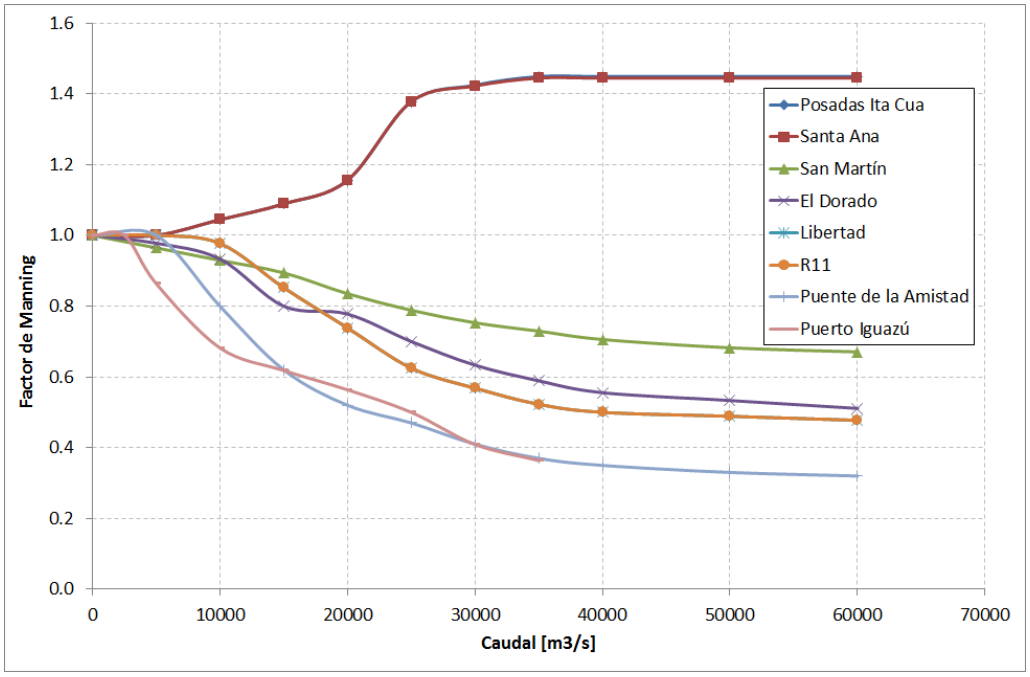
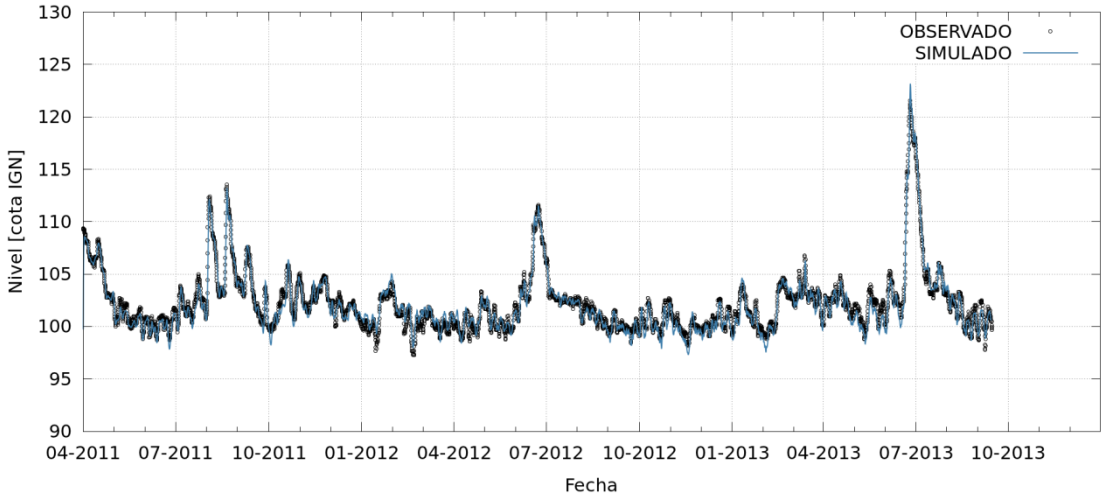
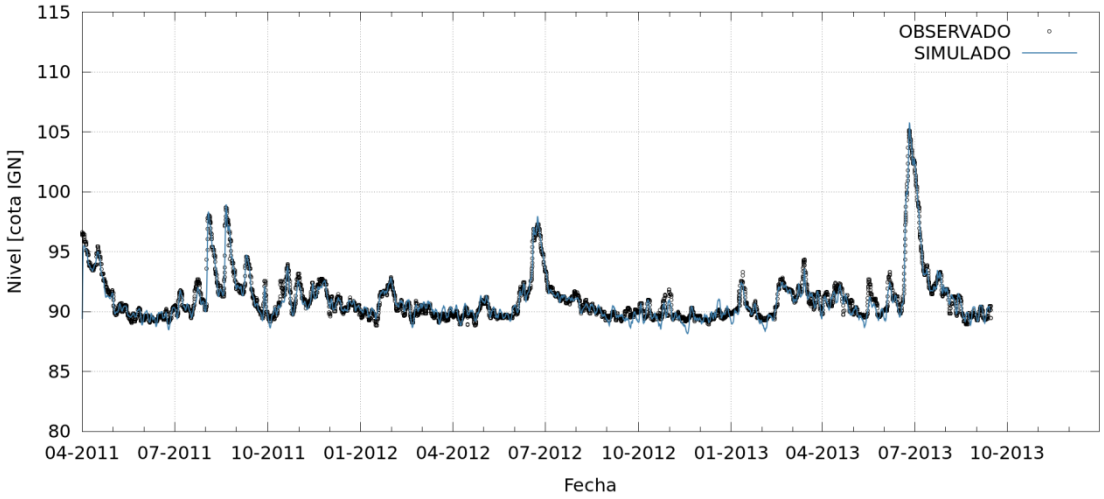


Figura 4.17. *Función de corrección del coeficiente de rugosidad de Manning en función del caudal para distintos tramos entre estaciones hidrométricas para etapa a cota definitiva.*

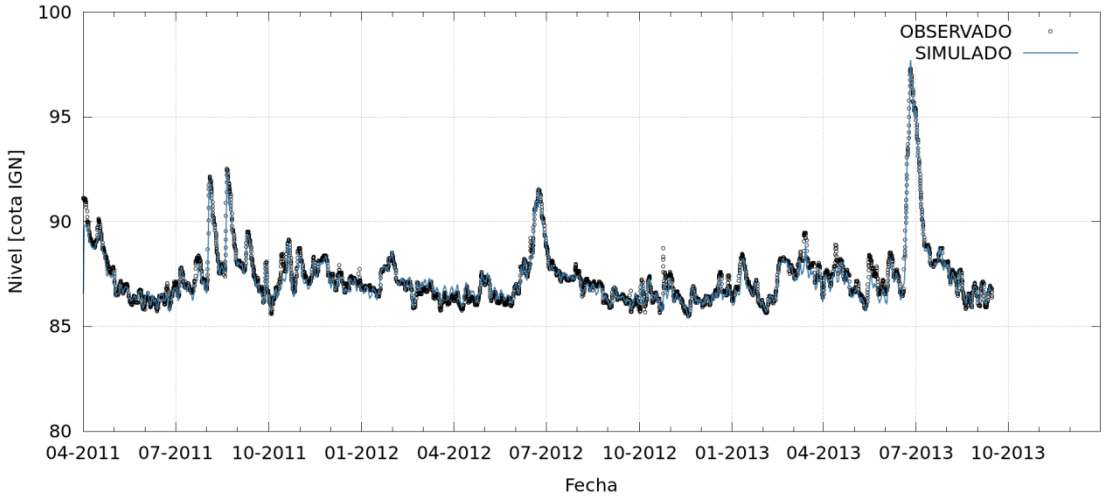
La Figura 4.18 presenta la comparación entre observaciones y simulación. Se observa un acuerdo muy satisfactorio para las 4 estaciones. Esto se refleja en los indicadores de bondad de ajuste, mostrados en la Tabla 4.5, donde no se incluye Santa Ana debido a la extensión acotada de los registros.



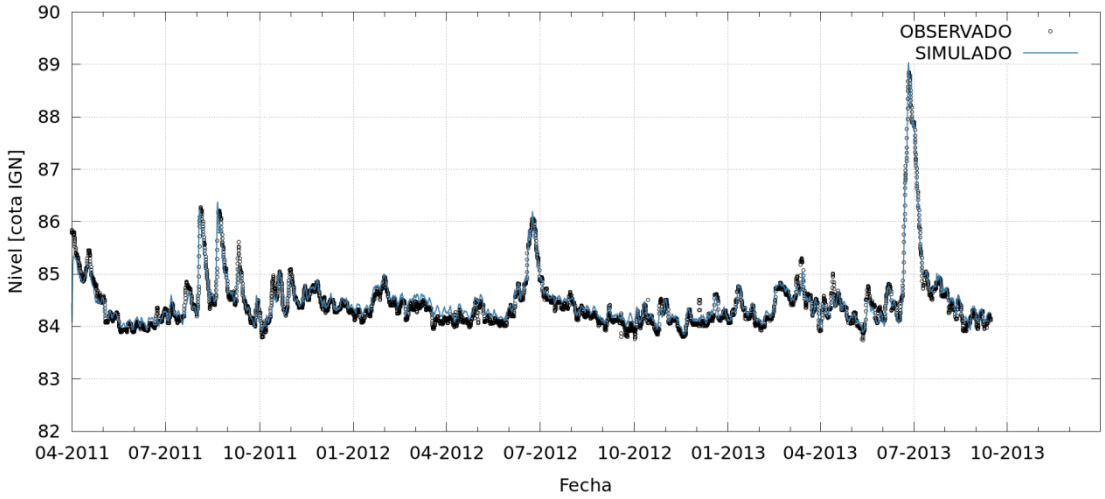
a) *Puerto Iguazú*



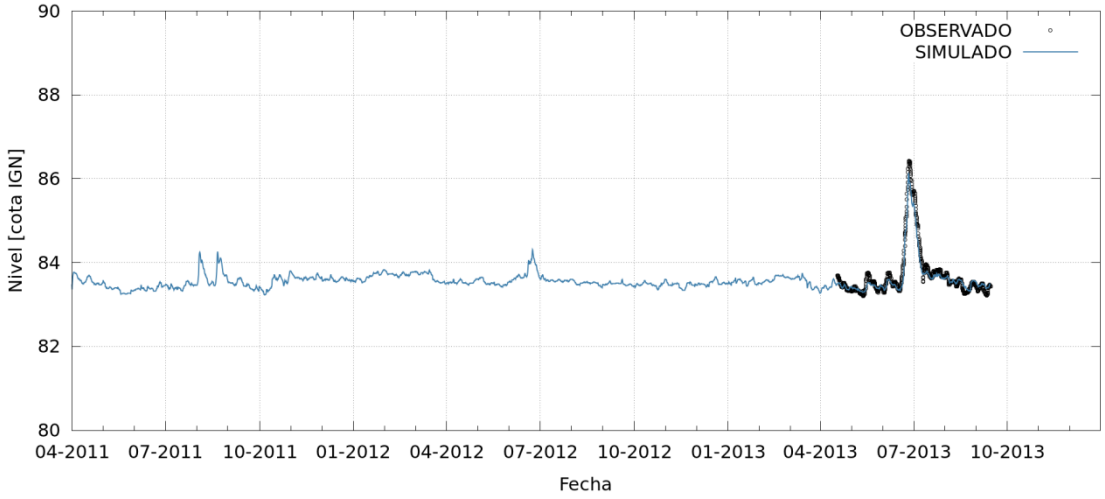
b) *El Dorado*



c) *Libertador Gral. San Martín*



d) *Puerto Maní*



e) *Santa Ana*

Figura 4.18. *Comparación entre niveles simulados y observados con el modelo MOAGAR para etapa a cota definitiva en diferentes estaciones hidrométricas.*

Tabla 4.5. *Indicadores de bondad de ajuste del modelo MOAGAR para etapa a cota definitiva.*

Estación	*MED* (m)	*RMSE* (m)	R^2	*NSE*
Puerto Iguazú	0,11	0,47	0,95	0,95
El Dorado	-0,07	0,28	0,94	0,94
Libertador Gral. San Martín	0,11	0,14	0,94	0,93
Puerto Maní	-0,04	0,03	0,92	0,90

A título de verificación, en la Figura 4.19 se muestra la comparación para la estación Libertad, donde, como en el caso previo al llenado, se observa un acuerdo muy satisfactorio en modulación, pero una subestimación sistemática que se interpreta asociada al cero de la escala.

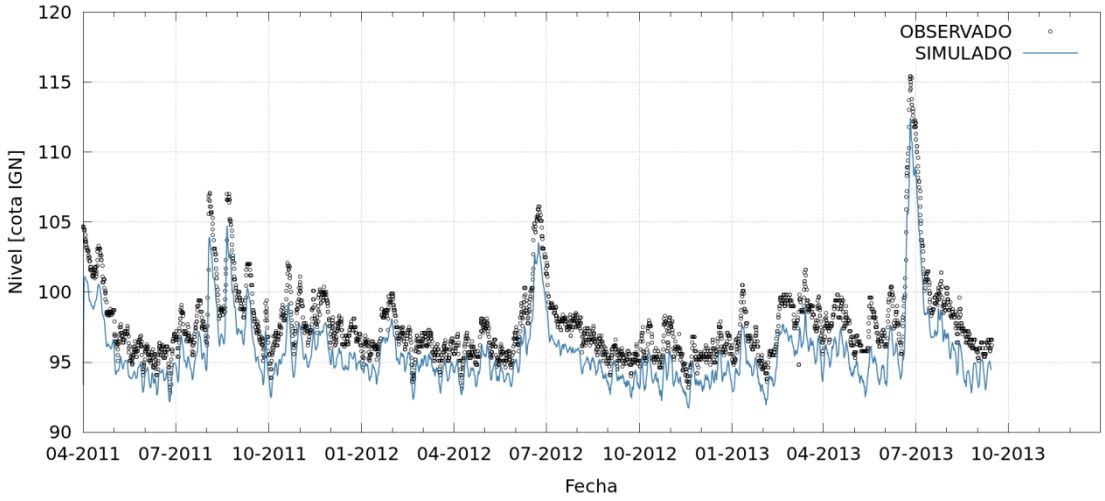


Figura 4.19. *Comparación entre niveles simulados y observados para etapa a cota definitiva en estación Libertad.*

Como verificación adicional, en la Figura 4.20 se comparan la relación altura-caudal en la estación R11 de acuerdo a lo que surge del modelo para la etapa a cota definitiva, y lo que proviene de los datos de serie temporal de caudal correspondiente al período 1982-1993 (si bien estos datos están asociados a la etapa previa al llenado, los valores de caudal fueron obtenidos, a partir de los de nivel, utilizando la relación altura-caudal utilizada en el presente). El acuerdo se considera muy satisfactorio.

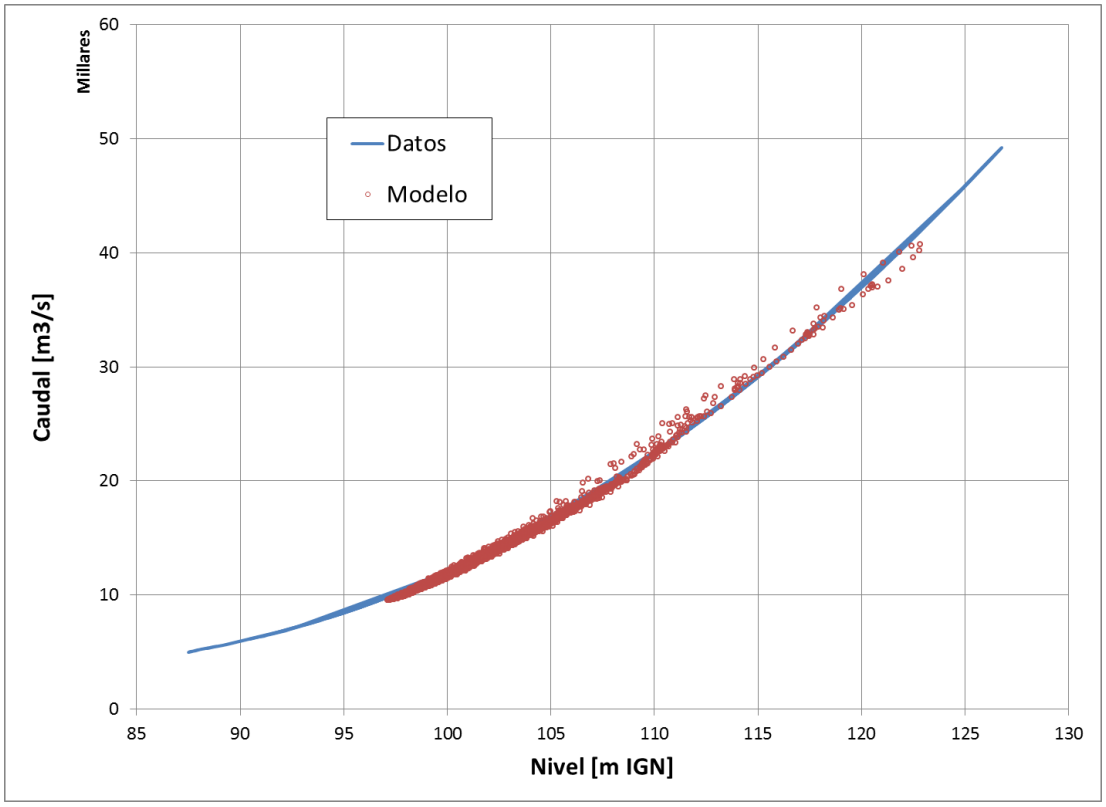


Figura 4.20. *Comparación entre la relación altura-caudal en R11 de acuerdo a los datos y al modelo MOAGAR para etapa a cota definitiva.*

5 CONCLUSIONES

Las siguientes son las principales conclusiones de esta etapa del estudio:

- La información hidrométrica antecedente ha provisto una base de datos y una caracterización hidrológica de la zona de estudio. Esta será completada durante el presente estudio.
- La información topobatimétrica disponible ha provisto un MDE del terreno y del cauce. Este será ajustado de acuerdo a la nueva información que se incorpore durante el presente estudio.
- El modelo hidrodinámico preliminar ha mostrado una performance satisfactoria en relación a los datos registrados hasta octubre de 2013. Pero la incorporación de nueva información hidrométrica y topobatimétrica durante el presente estudio generará la necesidad de efectuar ajustes en la calibración.

REFERENCIAS

Alvarez Tagliabúe, C.U., Menéndez, A.N., 2003. Modelación hidrodinámica del embalse de Yacyretá, Informe INA-LHA 01-224-03, Comitente: Entidad Binacional Yacyretá.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles, J. Hydrol., 10, 282–290.