



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



*Comisión Mixta Argentino Paraguaya
del Río Paraná*

ESTUDIO DE APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO ITATÍ-ITACORÁ

Informe Final



Proyecto LHA370
Informe LHA 08-370-19
Ezeiza, Octubre de 2019

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Ing. Pablo SPALLETTI

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Julio C. DE LÍO

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO (Orden alfabético)

INA

Ing. Nicolás D. BADANO

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

Ing. Emilio LECERTÚA

Ing. Nicolás TOMAZÍN

Paraguay

Ing. Mag. Cristian ESCOBAR JARITÓN

Ing. Benito PEREIRA

ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO ITATÍ-ITACORÁ

Informe Final

RESUMEN

Se presentan estudios hidráulicos de base para el proyecto de aprovechamiento de Itatí-Itacorá. Se determinan las áreas inundadas por el futuro embalse, las curvas clave altura-caudal en la sección de cierre y en la restitución de la presa de Yacyretá, la acción del oleaje sobre las márgenes del embalse, el aporte hidrológico desde la margen derecha (Paraguay) e izquierda (Argentina), la sedimentación en el futuro embalse y la eventual perturbación de la dinámica hidrosedimentológica aguas abajo del futuro cierre.

Descriptor temático: Climatología. Modelación hidrodinámica. Áreas inundadas. Curvas clave. Sedimentación. Erosión de márgenes. Red de monitoreo.

Descriptor geográfico: Río Paraná, Río Paraguay, Cierre Itatí-Itacorá, Embalse de Yacyretá, Argentina, Paraguay.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	6
2	CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS	8
2.1	Generalidades	8
2.2	Estadísticas	10
2.2.1	Precipitación	10
2.2.2	Temperatura	10
2.2.3	Humedad Relativa	12
2.2.4	Vientos	12
2.3	Evaporación	13
2.4	Balance hídrico	16
2.5	Análisis de vientos	16
2.5.1	Datos de base	16
2.5.2	Intensidad y dirección	17
2.5.3	Valores extremos	19
2.5.4	Análisis de persistencia	19
2.5.5	Análisis para el registro de San Cosme	21
3	EFFECTOS HIDRODINÁMICOS	24
3.1	Consideraciones generales	24
3.2	Modelo hidrodinámico unidimensional	24
3.3	Escenarios de obra	28
3.4	Modelo hidrodinámico bidimensional	30
3.5	Relación altura-caudal en la restitución de Yacyretá	31
3.6	Perfiles Longitudinales	36

3.7	Crecida Máxima Probable	43
3.8	Modelo hidrodinámico 1D con actualización de secciones	45
3.9	Distribución lateral de caudales en las secciones de cierre	45
3.10	Navegación	49
3.10.1	Planteo del problema	49
3.10.2	Ensayos a caudal constante	49
3.10.3	Ensayos con empuntamiento en las centrales	53
3.11	Modelo hidrodinámico 1D con actualización de MDE	58
3.12	Áreas inundadas	61
3.13	Curvas clave	75
3.13.1	Datos escala hidrométrica de Itatí	75
3.13.2	Análisis de escala hidrométrica de Itatí	78
3.13.3	Otras curvas clave	82
4	ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICOS Y DE EROSIÓN	84
4.1	Consideraciones generales	84
4.2	Deposición de sedimentos finos en el embalse Itatí-Itacorá	84
4.2.1	Planteo del problema	84
4.2.2	Antecedentes	84
4.2.3	Implementación del modelo	86
4.2.4	Resultados	88
4.2.5	Sensibilidad de los resultados	91
4.3	Erosión aguas abajo del cierre Itatí-Itacorá	92
4.3.1	Planteo del problema	92
4.3.2	Análisis de antecedentes	92
4.3.3	Evolución para fondo no consolidado	96
4.4	Acarreo de fondo en embalse	101
4.5	Acción erosiva sobre márgenes	103
5	ACCIÓN DEL OLEAJE	104
5.1	Consideraciones generales	104
5.2	Metodología de modelación del oleaje	104
5.3	Dominio de cálculo	106

5.4 Escenarios de cálculo	107
5.5 Predicción de olas	107
5.5.1 Resultados para Alternativa 1A	111
5.5.2 Resultados para Alternativa 1B	112
5.5.3 Resultados para Alternativa 2A	114
5.5.4 Resultados para Alternativa 2B	115
5.5.5 Resultados sobre las márgenes	116
5.5.6 Envolventes y exposición	117
5.6 Registro de vientos en San Cosme	120
5.7 Temporal del 25 de abril de 2017	122
5.8 Erosión potencial por oleaje	127
5.8.1 Metodología de cálculo	127
5.8.2 Predicción de erosión potencial	130
5.8.3 Evaluación del modelo de erosión	134
6 APORTE HIDROLÓGICO	140
6.1 Consideraciones generales	140
6.2 Modelación hidrológica	141
6.2.1 Software	141
6.2.2 Implementación	141
6.2.3 Características de las subcuencas	141
6.2.4 Tormenta de diseño	142
6.2.5 Método de Pérdidas	142
6.2.6 Método de transformación Precipitación - Escorrentía	144
6.3 Margen paraguaya	145
6.3.1 Subcuencas	145
6.3.2 Precipitación	149
6.3.3 Pérdidas	155
6.3.4 Escorrentía	157
6.3.5 Hidrogramas	158
6.4 Margen argentina	164
6.4.1 Subcuencas	164
6.4.2 Precipitación	166
6.4.3 Pérdidas	166
6.4.4 Escorrentía	168

6.4.5	Hidrogramas	168
7	RED DE MONITOREO	172
7.1	Objetivo de revisión	172
7.2	Red actual	172
7.3	Red propuesta	174
8	CONCLUSIONES	178
9	REFERENCIAS	184
ANEXO: MODELOS CONCEPTUALES Y PARÁMETROS UTILIZADOS EN HEC-HMS187		

1 INTRODUCCIÓN

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

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

Los principales objetivos del estudio son los siguientes:

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

En el Primer Informe Parcial (diciembre de 2017) se determinaron los efectos de remanso que provocaría el cierre Itatí-Itacorá (cuantificados a través de las áreas de inundación, los perfiles longitudinales del pelo de agua y las curvas altura-caudal en la restitución de Yacyretá), se efectuó un análisis para establecer la curva altura-caudal más confiable para la sección Itatí-Itacorá, se analizó el clima de olas que se generará en el embalse de Itatí-Itacorá, se llevó a cabo una estimación de la consecuente erosión potencial sobre las márgenes, y se determinaron hidrogramas de aporte hidrológico desde la margen argentina hacia el río Paraná.

En el Segundo Informe Parcial (abril de 2018) se establecieron las curvas clave altura-caudal en las posibles secciones de implantación del cierre Itatí-Itacorá, los tiempos de recurrencia para distintos caudales pico, la permanencia de los caudales diarios, las curvas caudal-nivel con el embalse Itatí-Itacorá para distintas localidades, los perfiles longitudinales del nivel de agua para condiciones naturales y en situación con presa para distintos caudales, el efecto de Itatí-Itacorá sobre la restitución de la Central de Yacyretá para niveles de embalse intermedios entre 59.0 m y 61.0 m, los perfiles longitudinales asociados a la CMP correspondientes a las distintas alternativas de cierres, y la distribución lateral de velocidades

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

En el Tercer Informe Parcial (junio de 2018) se determinó la distribución de tasas de deposición de sedimentos fino en suspensión dentro del embalse de Itatí-Itacorá, se evaluó la erosión de fondo esperable al pie de la presa de Itatí-Itacorá por el corte de transporte de sedimentos, se calcularon hidrogramas de aporte al embalse de Itatí-Itacorá para eventos de larga duración, y se analizó la falla del puente sobre el arroyo Iribú Cuá perteneciente a la Ruta Nacional 12.

En el Cuarto Informe Parcial (setiembre de 2018) se presentaron estadísticas climatológicas (a partir de las cuales se estimó el balance hídrico en el futuro embalse de Itatí-Itacorá), indicadores de navegabilidad, análisis de acarreo de fondo en el futuro embalse de Itatí-Itacorá, indicadores de acción erosiva sobre las márgenes, y ubicación sugerida de una red de hidrómetros para monitoreo.

En este Informe Final, además de volcarse todos los resultados obtenidos previamente, se presentan algunas actualizaciones y ampliaciones. En particular, se describe y utiliza el modelo hidrodinámico definitivo, construido a partir de la información topográfica generada ad-hoc por el IGN. La organización del informe es como sigue:

- En el capítulo 2 se presenta la caracterización climatológica de la zona.
- En el capítulo 3 se analizan los efectos hidrodinámicos provocados por el cierre Itatí-Itacorá.
- En el capítulo 4 se efectúan análisis sedimentológicos y de erosión por corrientes.
- En el capítulo 5 se estudia el oleaje y su eventual efecto erosivo sobre las márgenes.
- En el capítulo 6 se determinan los hidrogramas de aporte hidrológico desde ambas márgenes hacia el río Paraná.
- En el capítulo 7 se plantea una red de hidrómetros para monitoreo.
- En el capítulo 8 se presentan las conclusiones del estudio.

2 CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

2.1 Generalidades

En la **Figura 2.1** se muestran las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en Argentina y la Dirección de Meteorología e Hidrología (DMH) en Paraguay. Las variables y periodo de medición se indican en la **Tabla 2.1**.

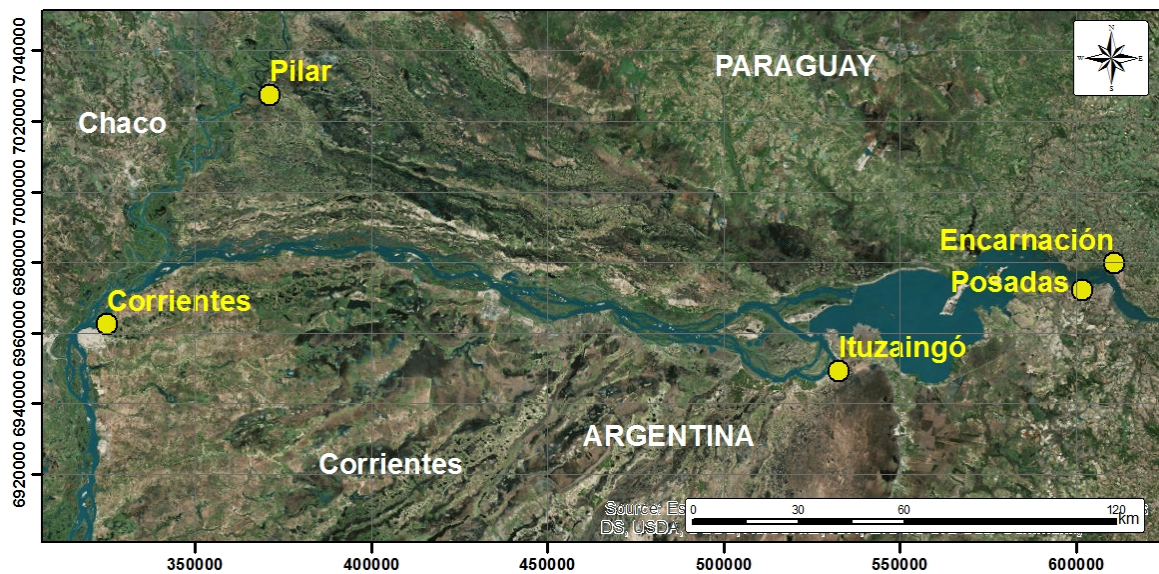


Figura 2.1. Ubicación de estaciones meteorológicas del SMN y el DMH.

Tabla 2.1. Variables meteorológicas para estaciones meteorológicas del SMN y el DMH.

Estación	Inicio del registro	Condición	Variables meteorológicas
Corrientes (Argentina)	01/11/1961	Activa hasta la fecha	Precipitación, Temperatura, Humedad, Heliofanía, Presión Atmosférica, Velocidad y Dirección de Viento
Posadas (Argentina)	01/01/1961	Activa hasta la fecha	Precipitación, Temperatura, Humedad, Heliofanía, Presión Atmosférica, Velocidad y Dirección de Viento
Ituzaingó (Argentina)	01/07/1962	Activa hasta la fecha (con muchos vacíos de información)	Precipitación, Temperatura, Humedad, Heliofanía, Presión Atmosférica, Velocidad y Dirección de Viento
Encarnación (Paraguay)	01/01/1951	Activa hasta la fecha	Precipitación, Temperatura, Humedad, Velocidad y Dirección de Viento
Pilar (Paraguay)	01/01/1958	Activa hasta la fecha	Precipitación, Temperatura, Humedad, Velocidad y Dirección de Viento

Adicionalmente, existen varias estaciones meteorológicas del INTA, Ministerio de Producción de Corrientes (MPC) y de la Entidad Binacional Yacyretá (EBY) cuya información se encuentra en el Portal Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica (SIGA) del INTA¹ (Figura 2.2).

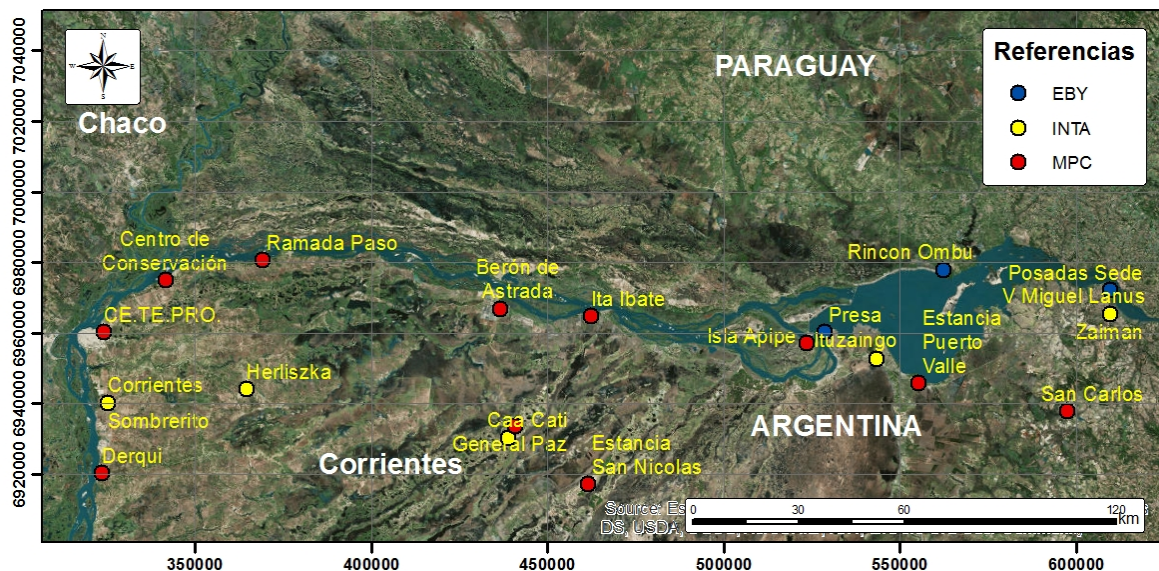


Figura 2.2. Ubicación de estaciones meteorológicas del Portal SIGA.

¹ <http://siga2.inta.gov.ar/#/>

Para el análisis estadístico de los datos climáticos y el balance hídrico se utilizó la información correspondiente a la estación meteorológica Corrientes (Aeropuerto) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (**Figura 2.1**). Se contó con los registros de parámetros climáticos, a paso diario, desde el año 1961 hasta 2016. Para el período de análisis se consideró un período de 10 años, desde 2006 a 2015. Los datos climáticos, a escala diaria, son los siguientes:

- Temperatura máxima
- Temperatura mínima
- Temperatura media
- Presión atmosférica
- Precipitación
- Humedad relativa
- Heliofanía
- Velocidad máxima del viento
- Velocidad media del viento

2.2 Estadísticas

2.2.1 *Precipitación*

Del análisis de precipitaciones diarias surge que la precipitación anual media es de 1180 mm. En la **Figura 2.3** se muestra el gráfico de la precipitación media mensual. Los valores mínimos de precipitación se dan en el invierno, particularmente en los meses de junio, julio y agosto, con un extremo de aproximadamente 30 mm en el mes de julio. Los valores máximos de precipitación se dan en los meses estivales y comienzo de la primavera, con extremos del orden de los 170 mm.

2.2.2 *Temperatura*

En verano el clima es caluroso durante todo el día. En otoño y primavera es agradable durante el día, con noches frescas a frías. En invierno es agradable y fresco con noches frías. En la **Figura 2.4** se muestra el gráfico de la temperatura máxima y mínima media mensual. Los valores mínimos de temperatura se dan en el mes de julio, con valores de aproximadamente 22 °C y 10 °C respectivamente. Los valores máximos de temperatura se dan en el mes de enero, con valores de aproximadamente 33 °C y 22 °C, respectivamente. La temperatura media anual máxima es 27.6 °C y la mínima 16.3 °C.

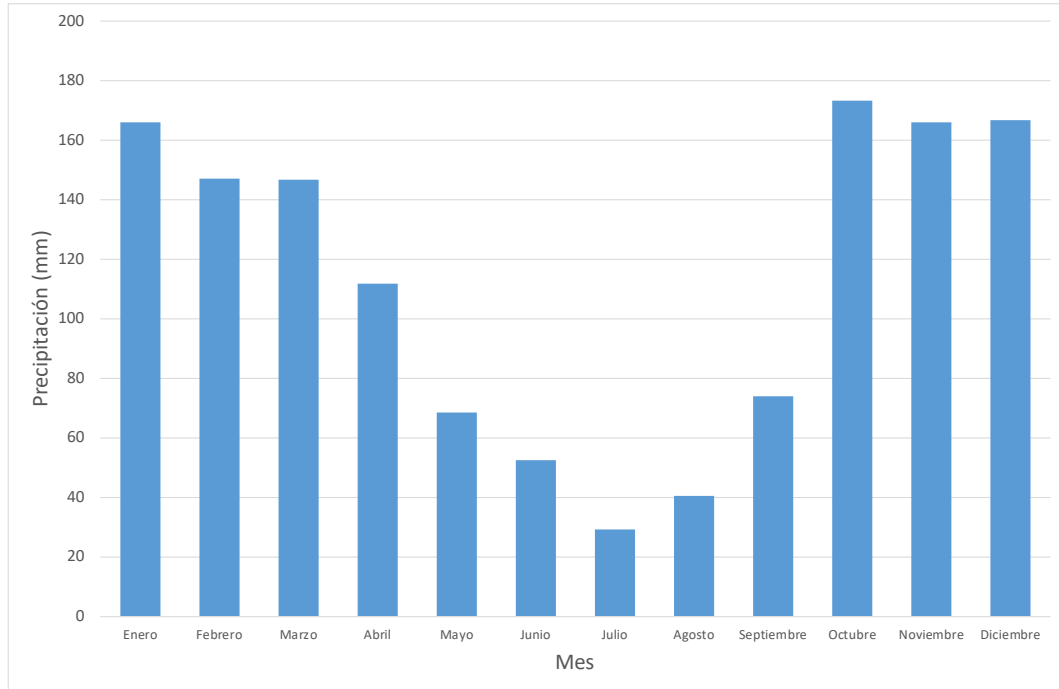


Figura 2.3. Precipitación media mensual en la estación Corrientes (2006-2015)

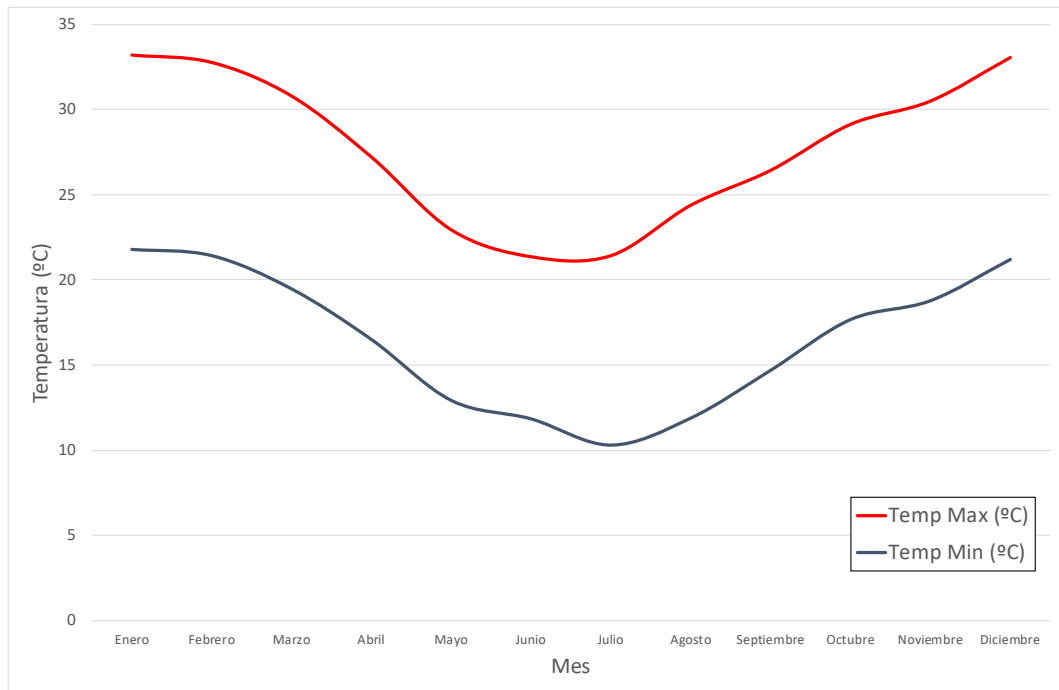


Figura 2.4. Temperatura mínima y máxima media mensual en la estación Corrientes (2006-2015)

2.2.3 Humedad Relativa

El clima es húmedo, con altos valores de humedad durante todo el año. En la **Figura 2.5** se muestra el correspondiente gráfico de la Humedad Relativa, cuya media anual es de aproximadamente 72%.

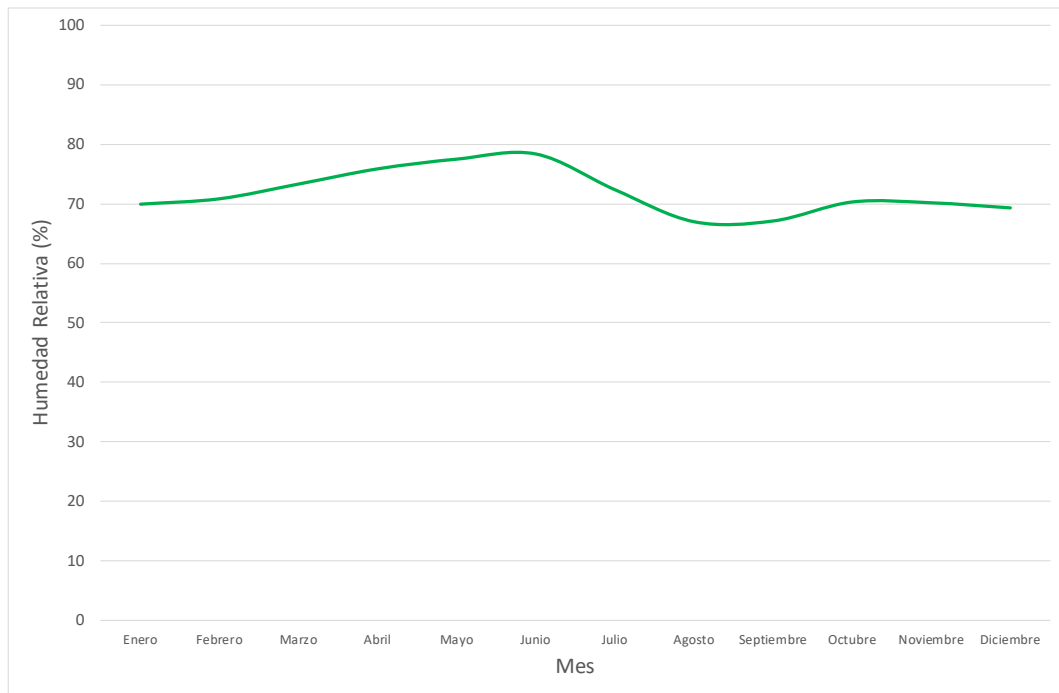


Figura 2.5. Humedad Relativa media mensual en la estación Corrientes (2006-2015)

2.2.4 Vientos

En la **Figura 2.6** se muestra el gráfico de viento medio mensual, cuya media anual es de 12 km/h. Los máximos valores de velocidad media del viento se dan en agosto, setiembre y octubre, de aproximadamente 14 km/h, y los mínimos en marzo, abril y mayo, del orden de 10 km/h.

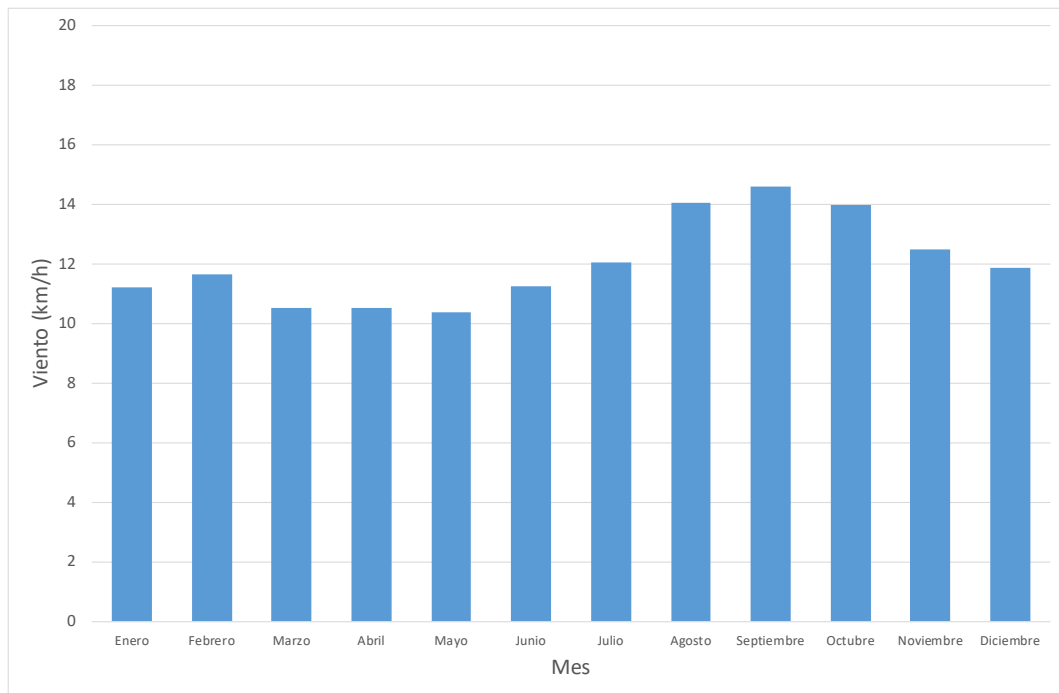


Figura 2.6. Viento medio mensual en la estación Corrientes (2006-2015)

2.3 Evaporación

Para estimar la evaporación en cuerpos de agua se utilizan numerosas fórmulas. Estas se determinan a partir de diferentes enfoques tales como: métodos de balance de agua, balance energético, aerodinámico y de tanques evaporímetros.

Una de las fórmulas más utilizadas es la de Penman (1948). Esta formulación tiene base física, combinando el método de balance energético con el aerodinámico. La evaporación por unidad de superficie se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$EV = \frac{\frac{\Delta}{\lambda} R_n + \gamma \cdot E_a}{\Delta + \gamma}$$

siendo:

EV = Evaporación por unidad de superficie (mm/día)

R_n = Radiación Neta ($MJ/m^2/día$)

λ = Calor latente de vaporización (MJ/kg)

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor ($kPa/°C$)

γ = Constante psicométrica ($kPa/°C$)

E_a = Componente aerodinámica

La componente aerodinámica, a su vez, puede estimarse como:

$$E_a = f(u_2) \cdot (e_s - e_a) = 0,26 (1 + 0,54 \cdot u_2) \cdot (e_s - e_a)$$

siendo:

e_s = Presión de vapor de saturación (kPa)

e_a = Presión real de vapor (kPa)

$e_s - e_a$ = Déficit de presión de vapor

u_2 = Velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

Esta formulación puede utilizarse para estimar la evaporación en lagos a partir de aplicar un factor, que suele adoptarse en 0.70 (Viessman & Lewis, 2003).

Existe una gran cantidad de formulaciones empíricas que se basan en el balance energético, cuya ecuación general tiene la siguiente forma:

$$EV = k \cdot (e_s - e_a)$$

siendo:

EV = Evaporación por unidad de superficie

k = Coeficiente que depende de varios factores tales como: velocidad del viento, presión atmosférica, humedad relativa, etc.

$e_s - e_a$ = Déficit de presión de vapor

Una ecuación empírica que se utiliza habitualmente es la desarrollada por Dunne & Lepold (1978):

$$EV = (0.013 + 0.00016u_2)e_a \frac{(100 - HR)}{100}$$

siendo:

EV = Evaporación por unidad de superficie (cm/día)

e_a = Presión real de vapor (mb)

u_2 = Velocidad del viento a 2 m de altura (km/día)

HR = Humedad Relativa (%)

Otra ecuación de uso habitual es la de Meyer (1944):

$$EV = C \cdot (e_s - e_a) \left(1 + \frac{W}{10}\right)$$

siendo:

EV = Evaporación por unidad de superficie (pulgadas/día)

C = Coeficiente que se adopta en 0.36 para lagos

$e_s - e_a$ = Déficit de presión de vapor (pulgadas Hg)

W = Velocidad del viento a 25 pies de altura (millas / hora)

A partir de los datos meteorológicos, se calculó la evaporación diaria del embalse con las 3 formulaciones presentadas a paso diario. El periodo considerado es de 10 años (2006-2015), en correspondencia con el periodo de los datos meteorológicos. En la **Figura 2.7** se muestra la evaporación media mensual obtenida con los 3 métodos. Se observa que los métodos de Penman y Dunne dan valores similares, mientras que el de Meyer provee valores mayores. La evaporación media anual por el método de Penman y Dunne es del orden de los 1010 mm/año, mientras que por el método de Meyer es de 1470 mm/año.

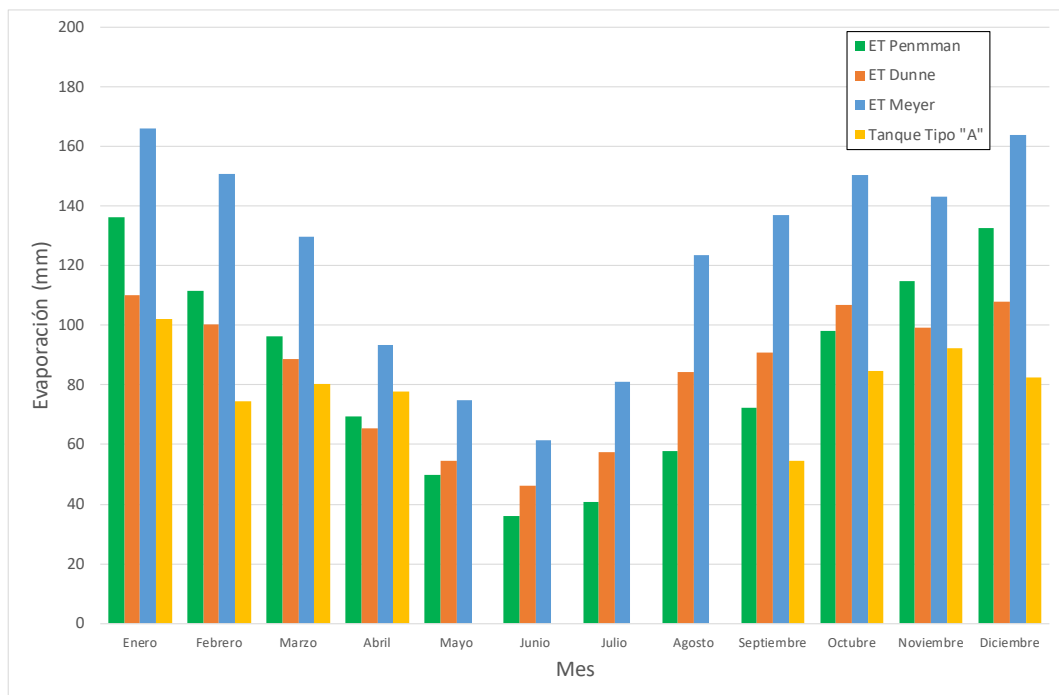


Figura 2.7. Evaporación media mensual con diferentes métodos

Adicionalmente, se contrastaron los métodos con datos de tanque evaporímetro. El SMN no tiene tanques evaporímetros en la zona de estudio. Se utilizaron entonces datos elaborados por la estación Cerro Azul del INTA a partir del informe de Heck et al. (2017). En el mismo se informan los valores de evaporación de un Tanque Evaporímetro Tipo “A” desde septiembre de 2014 hasta abril de 2015. Se calculó la evaporación media mensual a partir de los datos del Tanque Evaporímetro y se la comparó con los diferentes métodos. Si bien no se dispuso de información para los meses de mayo a agosto, para los meses restantes se observa una mayor consistencia con lo estimado por los métodos de Penman y Dunne, por lo que se adoptaron estos dos últimos como representativos.

2.4 Balance hídrico

El balance hídrico surge de la diferencia entre la precipitación y la evaporación media mensual. Los resultados con los 2 métodos de cálculo adoptados para estimar la evaporación para el período de análisis se presentan en la **Figura 2.8**. Se distingue un período de exceso, que comprende los meses de octubre a junio, y uno de déficit, que va de julio a setiembre. Es interesante comprobar que en los meses de mayor evaporación (primavera y verano) la precipitación más que compensa las pérdidas por evaporación. El balance medio anual es de aproximadamente +27 mm por ambos métodos.



Figura 2.8. Balance hídrico del embalse

2.5 Análisis de vientos

2.5.1 Datos de base

Se llevó a cabo un análisis detallado de los vientos en la zona de proyecto. Para ello se dispuso de registros horarios del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) en la estación Posadas correspondientes al período de 26 años entre el 01/Ene/1991 al 31/Dic/2016, obtenidos en función de un estudio previo de oleaje efectuado para el embalse de Yacyretá. Consta en total de 227.928 datos horarios. Cabe destacar que no se contó con datos similares para la estación Corrientes.

En primera instancia, los datos (valores medios horarios de intensidad de viento) se clasificaron direccionalmente en una rosa de 16 rumbos. Los datos provistos (Km/h) fueron computados en rangos de 10 Km/h. Cada rango de velocidad de 10 Km/h fue conformado por datos W_i tales que $W_{inferior} \leq W_i < W_{superior}$. Se determinaron 227.380 datos válidos, de los cuales 35.236 presentaron $W < 5$ Km/h (1,4 m/s) y fueron considerados “calma”. El registro presentó además 554 líneas de datos no válidos.

2.5.2 Intensidad y dirección

Para el conjunto de datos disponibles se determinó la distribución de intensidad y dirección de viento presentada en la **Tabla 2.2**. De ellas surgen los histogramas presentados en la **Figura 2.9** y la **Figura 2.10**, respectivamente. Las frecuencias se refieren al total de datos válidos.

En la **Figura 2.9** se observa que el sector SE presenta un claro predominio, y que más de la mitad de los vientos soplan de los sectores NE a SE. Los sectores SW a NW representan solo el 15% de los datos.

La **Figura 2.10** muestra que más del 77% de los datos válidos corresponde a valores inferiores a $W = 20$ km/h, y apenas el 0.95 % superan el valor de $W = 30$ km/h ('vientos intensos').

Tabla 2.2. Distribución frecuencial de vientos (en miles). Estación Posadas (1991-2016).

W (Km/h)	DIRECCION																TOTAL	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW		
3.6 - 10	13.63	16.61	42.58	29.64	57.00	39.31	97.59	39.01	35.61	9.38	10.08	4.50	6.63	3.66	8.11	6.17	419.52	
10 - 20	16.49	20.66	54.28	29.41	33.75	14.89	60.63	27.87	31.02	17.75	14.54	5.90	8.84	3.81	7.84	6.36	354.02	
20 - 30	4.97	4.03	10.74	4.19	3.29	1.08	4.58	2.67	5.44	6.97	5.00	1.99	2.12	0.81	1.82	2.28	61.98	
30 - 40	0.68	0.55	0.97	0.50	0.47	0.08	0.33	0.25	0.79	1.49	0.85	0.33	0.44	0.11	0.23	0.26	8.33	
40 - 50	0.02	0.02	0.04	0.04	0.08	0.00	0.01	0.03	0.08	0.20	0.13	0.04	0.07	0.01	0.02	0.03	0.84	
50 - 60	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.06	0.07	0.00	0.04	0.00	0.00	0.01	0.27	
60 - 70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	
70 - 80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	
80 - 90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
90 - 100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
TOTAL	35.7903	41.8726	108.624	63.7831	94.6037	55.3611	163.145	69.8302	73.0055	35.8607	30.6843	12.7716	18.1546	8.41323	18.0227	15.1113	845.03	
																	CALMA	154.97
																	TOTAL	1000

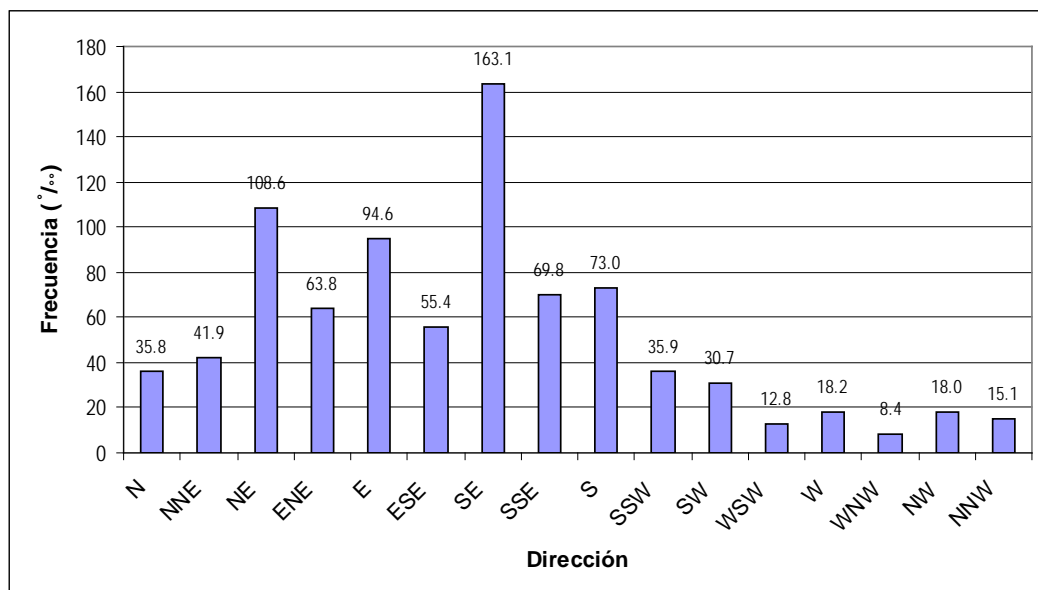


Figura 2.9. Histograma de dirección de viento. Posadas 1991-2016

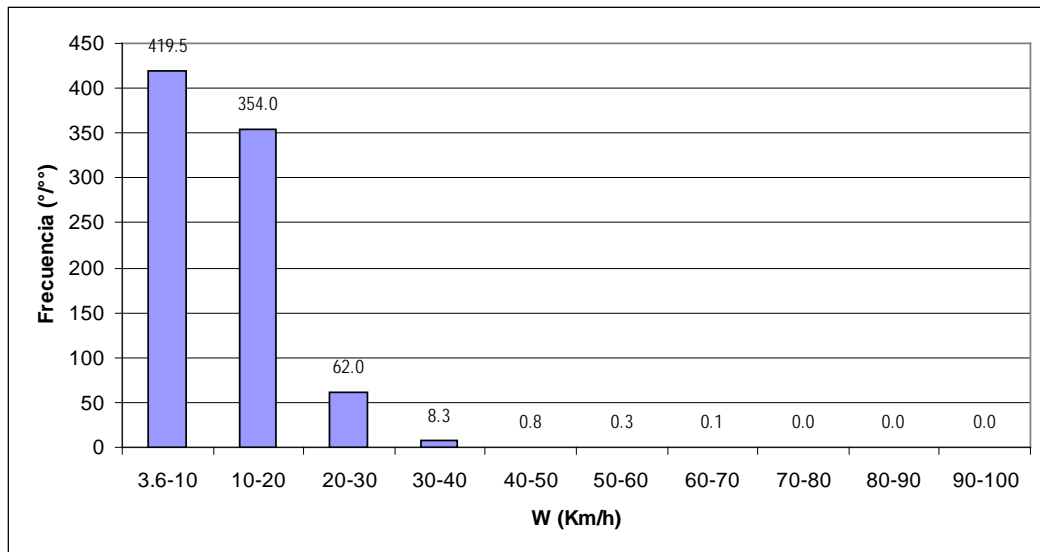


Figura 2.10. Histograma de intensidad de viento. Posadas 1991-2016.

La Figura 2.11 presenta las rosas de vientos correspondientes a la totalidad de los datos y al conjunto de valores correspondientes a vientos intensos ($W > 30$ km/h). Se observan diferencias sustanciales entre ambas. De la segunda surge que la dirección más frecuente con la que se puede generar olas de significación es el SSW, destacándose en segunda instancia las direcciones SW, S y NE.

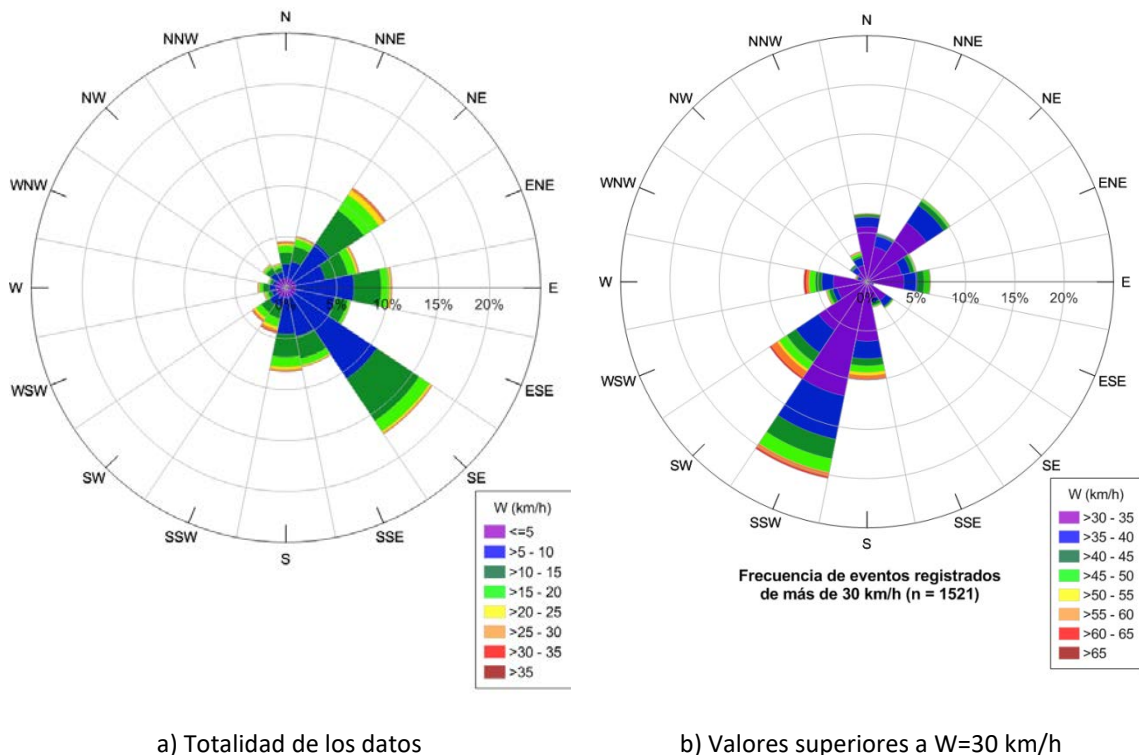


Figura 2.11. Rosa de vientos. Posadas 1991-2016.

2.5.3 Valores extremos

Utilizando el mismo registro permitió se realizó un análisis de valores extremos de la intensidad del viento. La **Tabla 2.3** presenta los valores máximos anuales de intensidad de viento medio horario (en Km/h) extraídos del registro de Posadas, clasificados en una rosa de 16 rumbos. La aplicación de un procedimiento de ajuste a esos valores extremos, utilizando una función de distribución GEV, permitió establecer los valores de intensidad de viento asociados a distintos períodos de retorno. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 2.4**.

Tabla 2.3. Posadas (1991 – 2015). Vientos medios horarios máximos anuales

AÑO	Máximas anuales de la velocidad media horaria (Km/h)															
	NORTE	NNE	NE	ENE	ESTE	ESE	SE	SSE	SUR	SSW	SW	WSW	OESTE	WNW	NW	NNW
1991	52.0	43.0	44.0	37.0	46.0	26.0	37.0	33.0	52.0	46.0	65.0	43.0	54.0	31.0	44.0	52.0
1992	35.0	39.0	56.0	37.0	37.0	24.0	37.0	33.0	52.0	56.0	50.0	41.0	74.0	65.0	33.0	37.0
1993	33.0	37.0	39.0	43.0	37.0	22.0	26.0	33.0	46.0	50.0	56.0	61.0	44.0	37.0	31.0	37.0
1994	33.0	44.0	33.0	37.0	31.0	24.0	35.0	30.0	30.0	39.0	54.0	35.0	33.0	24.0	28.0	31.0
1995	31.0	44.0	48.0	39.0	30.0	28.0	30.0	26.0	33.0	46.0	57.0	52.0	35.0	26.0	30.0	24.0
1996	39.0	37.0	33.0	35.0	33.0	26.0	39.0	46.0	54.0	54.0	30.0	33.0	30.0	30.0	30.0	30.0
1997	41.0	37.0	46.0	56.0	46.0	26.0	30.0	26.0	37.0	56.0	56.0	37.0	30.0	26.0	44.0	28.0
1998	35.0	39.0	31.0	35.0	33.0	22.0	33.0	33.0	43.0	63.0	43.0	33.0	35.0	30.0	28.0	30.0
1999	37.0	31.0	39.0	31.0	41.0	28.0	35.0	31.0	33.0	43.0	46.0	35.0	28.0	20.0	24.0	28.0
2000	31.0	37.0	37.0	41.0	31.0	24.0	37.0	33.0	56.0	50.0	46.0	35.0	33.0	31.0	37.0	30.0
2001	28.0	35.0	31.0	46.0	33.0	31.0	33.0	28.0	33.0	44.0	41.0	37.0	41.0	28.0	43.0	35.0
2002	37.0	28.0	33.0	35.0	41.0	30.0	35.0	33.0	35.0	61.0	54.0	33.0	30.0	35.0	31.0	37.0
2003	26.0	37.0	31.0	30.0	48.0	26.0	39.0	33.0	50.0	56.0	46.0	39.0	50.0	37.0	33.0	28.0
2004	31.0	31.0	43.0	31.0	31.0	24.0	31.0	37.0	41.0	57.0	31.0	33.0	31.0	26.0	22.0	33.0
2005	28.0	30.0	37.0	33.0	37.0	24.0	46.0	31.0	35.0	46.0	54.0	31.0	65.0	39.0	26.0	33.0
2006	31.0	30.0	28.0	37.0	35.0	26.0	30.0	31.0	33.0	39.0	30.0	31.0	28.0	26.0	26.0	37.0
2007	31.0	26.0	26.0	43.0	37.0	35.0	54.0	30.0	41.0	39.0	46.0	44.0	30.0	28.0	33.0	37.0
2008	30.0	26.0	31.0	37.0	30.0	22.0	30.0	56.0	52.0	43.0	31.0	43.0	46.0	26.0	31.0	63.0
2009	37.0	33.0	33.0	48.0	50.0	37.0	33.0	37.0	52.0	56.0	65.0	48.0	41.0	30.0	37.0	37.0
2010	33.0	33.0	37.0	39.0	28.0	26.0	31.0	37.0	65.0	50.0	43.0	33.0	33.0	30.0	33.0	28.0
2011	39.0	28.0	31.0	31.0	24.0	28.0	31.0	20.0	43.0	41.0	57.0	48.0	46.0	31.0	26.0	28.0
2012	33.0	33.0	33.0	28.0	46.0	26.0	28.0	28.0	69.0	69.0	46.0	46.0	50.0	41.0	33.0	56.0
2013	44.0	33.0	33.0	24.0	41.0	30.0	37.0	33.0	56.0	39.0	56.0	28.0	56.0	28.0	37.0	33.0
2014	35.0	26.0	37.0	31.0	37.0	28.0	37.0	35.0	46.0	50.0	46.0	31.0	31.0	28.0	41.0	46.0
2015	37.0	33.0	37.0	26.0	33.0	28.0	31.0	43.0	56.0	35.0	46.0	22.0	56.0	37.0	44.0	31.0

Tabla 2.4. Vientos probables para distintos períodos de retorno.

TR (años)	Intensidad del viento W (Km/h) por dirección															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	33.8	33.1	35.2	35.3	35.6	26.2	33.6	32.5	43.9	44.3	49.5	36.6	39.1	30.3	32.0	33.9
5	38.6	38.4	40.8	42.0	42.1	29.4	38.3	38.9	54.0	50.7	57.0	44.6	48.9	36.2	38.1	40.6
10	41.8	41.9	44.6	46.5	46.5	31.4	41.5	43.2	60.6	54.7	60.4	49.9	55.4	40.1	42.2	45.0
20	44.8	45.2	48.2	50.7	50.6	33.4	44.5	47.2	67.0	58.5	62.7	55.0	61.7	43.9	46.1	49.3
50	48.8	49.5	52.9	56.3	56.0	36.0	48.3	52.5	75.3	63.3	64.9	61.6	69.8	48.8	51.2	54.8
100	51.7	52.8	56.3	60.4	60.1	37.9	51.2	56.5	81.5	66.9	66.0	66.5	75.9	52.5	55.0	58.9

2.5.4 Análisis de persistencia

Se llevó a cabo un análisis de persistencia de vientos por octantes (8 sectores de 45°), a los efectos de obtener una caracterización sobre la duración de eventos para diferentes intensidades.

La definición de persistencia considera el tiempo durante el cual la velocidad del viento iguala o supera un determinado umbral de velocidad W_0 ($W \geq W_0$) de manera continua. Para ello se determinó la cantidad de datos medios horarios sucesivos de velocidad W_i que cumplen la

condición de pertenecer a un mismo sector direccional (octante) y cumplir con la condición $W_i \geq W_0$. Se analizaron umbrales con intervalos de 10 Km/h. Una serie de datos fue considerada continua (sin interrupciones a los efectos de computar la persistencia) aun cuando un dato W_i no cumpliera la condición si está precedido y sucedido por datos que sí la cumplen. Consecuentemente, cada evento de persistencia está constituido por una sucesión de datos que cumple los criterios arriba detallados. La duración del evento es la sumatoria de las duraciones de cada dato (1 hora) que constituye la serie. No hay, por lo tanto, eventos con duraciones inferiores a 1 hora.

Para el período de análisis, y en cada uno de los sectores considerados, se computaron el número total de eventos, los valores máximos y medios de la persistencia para el umbral correspondiente, y algunas propiedades estadísticas de la serie de persistencias. Estos resultados se presentan en la **Tabla 2.5**.

Tabla 2.5. Persistencia de viento por octante.

OCTANTE	ESTADÍSTICA	W (Km/h) >=							
		10	20	30	40	50	60	70	80
NORTE	Nro datos	5191	1413	230	15	4	1		
	duración (hs)	media	2.5	2.1	1.6	1.5	1.0		
		max	22.0	15.0	6.0	3.0	1.0		
	desv. standard	2.290	1.673	0.987	0.737	0.000			
	varianza	5.245	2.801	0.973	0.543	0.000			
	curtosis	7.359	6.266	4.872	1.320	0.000			
	coef. asimetría	2.346	2.173	2.152	1.632	0.000			
NE	Nro datos	6629	1407	145	8	2			
	duración (hs)	media	2.3	1.9	1.6	1.6	1.5		
		max	27	21	10	3	2		
	desv. standard	2.149	1.658	1.380	0.744	0.707			
	varianza	4.617	2.749	1.905	0.554	0.500			
	curtosis	15.700	23.775	16.660	-0.152				
	coef. asimetría	3.223	3.725	3.728	0.824				
ESTE	Nro datos	9562	1326	179	20	2			
	duración (hs)	media	2.1	1.7	1.5	1.4	1.0		
		max	22	12	7	4	1		
	desv. standard	1.927	1.322	1.081	0.811	0.000			
	varianza	3.715	1.749	1.168	0.657	0.000			
	curtosis	16.416	12.160	9.781	4.429				
	coef. asimetría	3.291	3.076	2.970	2.121				
SE	Nro datos	7093	720	67	4	1			
	duración (hs)	media	2.1	1.6	1.2	1.0	1.0		
		max	20.0	14.0	3.0	1.0	1.0		
	desv. standard	1.980	1.221	0.468	0.000				
	varianza	3.921	1.490	0.219	0.000				
	curtosis	15.579	32.431	5.533					
	coef. asimetría	3.322	4.427	2.445					
SUR	Nro datos	7808	2173	481	89	31	5		
	duración (hs)	media	2.8	1.9	1.4	1.2	1.0	1	
		max	51.0	22.0	8.0	3.0	1.0	1	
	desv. standard	3.299	1.730	0.822	0.396	0.000	0		
	varianza	10.885	2.994	0.675	0.157	0.000	0		
	curtosis	25.152	24.784	15.090	5.618				
	coef. asimetría	3.982	3.968	3.149	2.461				
SW	Nro datos	2404	842	184	44	18	3		
	duración (hs)	media	2.0	1.6	1.3	1.1	1.1	1	
		max	33.0	14.0	5.0	3.0	2.0	1	
	desv. standard	2.004	1.335	0.740	0.387	0.236			
	varianza	4.016	1.782	0.547	0.150	0.056			
	curtosis	48.506	19.186	9.788	14.133	18.000			
	coef. asimetría	5.386	3.652	2.932	3.682	4.243			
OESTE	Nro datos	2551	741	165	35	13	4	1	
	duración (hs)	media	2.2	1.8	1.5	1.2	1.2	1.5	
		max	46.0	35.0	8.0	5.0	4.0	3	1
	desv. standard	2.353	2.108	1.161	0.808	0.832	1		
	varianza	5.535	4.442	1.349	0.652	0.692	1		
	curtosis	67.588	98.383	11.555	15.045	13.000	4		
	coef. asimetría	5.770	7.760	3.244	3.814	3.606	2		
NW	Nro datos	160	83	33	5				
	duración (hs)	media	6.2	3.2	1.7	1.0			
		max	15.0	8.0	4.0	1.0			
	desv. standard	2.894	1.898	0.991	0.000				
	varianza	8.375	3.602	0.982	0.000				
	curtosis	1.986	0.369	1.089					
	coef. asimetría	1.272	0.880	1.359					

La **Figura 2.12** muestra en forma de histograma una síntesis del análisis de persistencia, señalando las duraciones media y máxima de eventos correspondientes a diferentes intensidades.

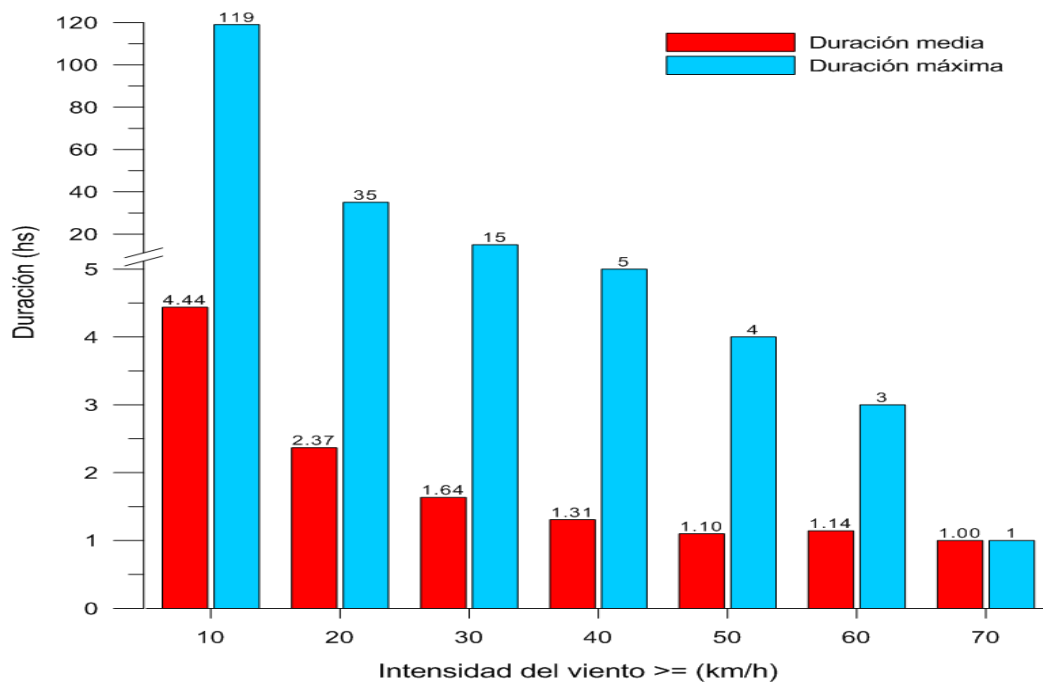


Figura 2.12. Duración media del viento para distintas intensidades.

2.5.5 Análisis para el registro de San Cosme

Si bien se trata de un registro de corta duración (abarca desde el 17 de febrero hasta el 11 de noviembre de 2017) y además carece de información direccional, el análisis de los datos de San Cosme resulta de interés dada su cercanía con la zona del proyecto, y porque se trata de un registro con un intervalo temporal de 10 minutos.

Los valores de intensidad promediados cada 10 minutos, transformados a una altura de referencia de 10 m, fueron ordenados en rangos de 5 km/h para determinar la distribución de frecuencia presentada en la **Figura 2.13**. Se observa que el 77.6% de los datos se encuentra en un rango de intensidades comprendido entre los 5 y los 20 km/h, mientras que sólo el 2.6% de los datos supera el umbral de 30 km/h.

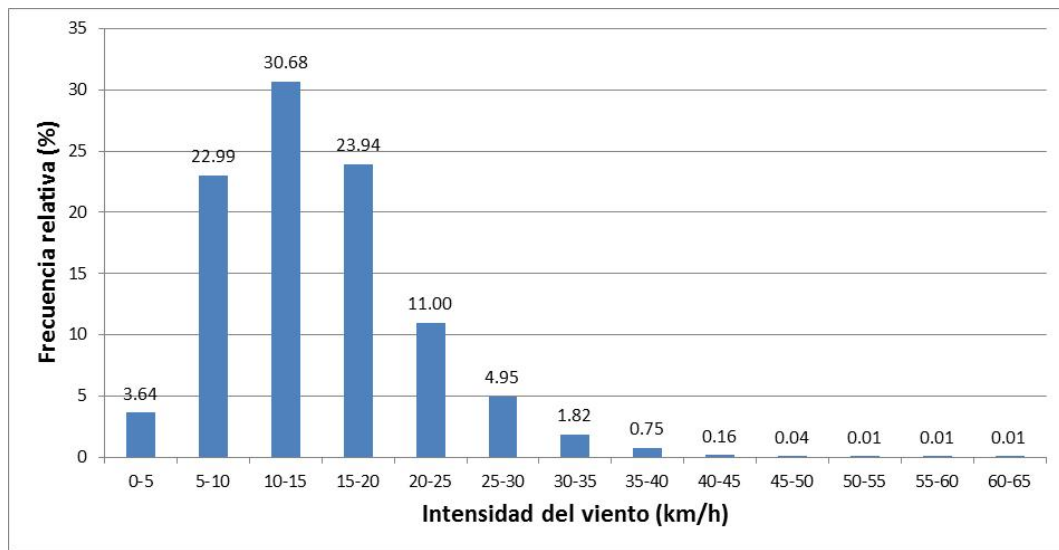


Figura 2.13. Distribución por rangos de intensidad del viento en San Cosme.

Del análisis de persistencia para diferentes valores de intensidad se obtuvo la cantidad de eventos asociados a distintas duraciones, que se presenta en la **Tabla 2.6**. La **Figura 2.14** muestra el histograma con las duraciones media y máxima correspondiente a cada rango de intensidad analizado.

Tabla 2.6. Distribución de la duración del viento por rangos de intensidad en San Cosme

Duración	Intensidad del viento >= (km/h)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
10 min	281	260	63	12	3	3	0	0
Más de 10 min	906	504	105	14	2	0	0	0
Más de 20 min	738	370	75	12	2	0	0	0
Más de 30 min	642	296	57	8	1	0	0	0
Más de 40 min	564	248	48	6	1	0	0	0
Más de 50 min	520	216	44	5	0	0	0	0
Más de 1 hora	477	191	38	3	0	0	0	0
Más de 5 horas	178	57	4	0	0	0	0	0
Más de 10 horas	96	16	1	0	0	0	0	0
Más de 24 horas	37	2	0	0	0	0	0	0
Más de 48 horas	10	0	0	0	0	0	0	0
Más de 72 horas	2	0	0	0	0	0	0	0

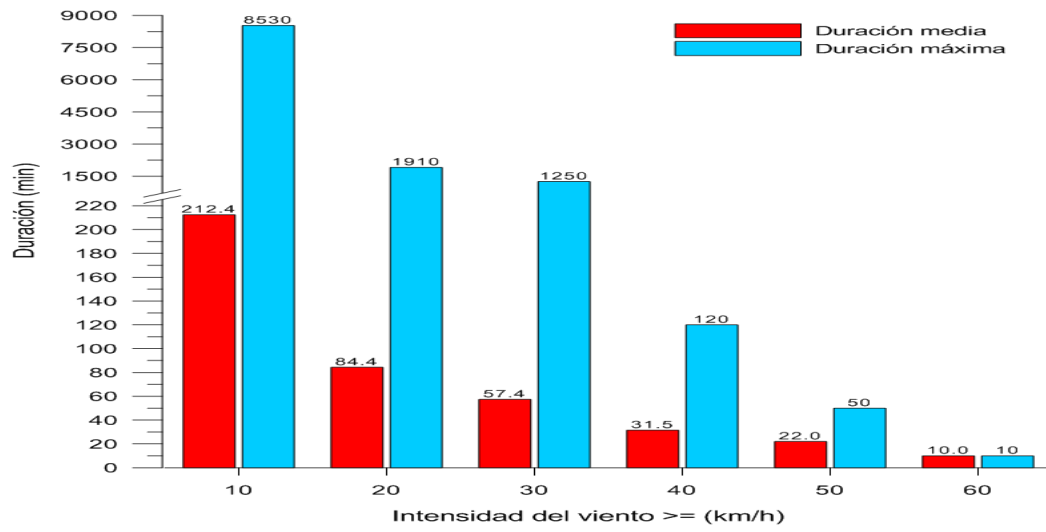


Figura 2.14. Duraciones media y máxima para distintas intensidades.

3 EFECTOS HIDRODINÁMICOS

3.1 Consideraciones generales

La construcción del cierre Itatí-Itacorá producirá una serie de efectos hidrodinámicos, tanto aguas arriba como aguas abajo, que influirá sobre los distintos procesos y usos que tienen lugar en esa zona. Para cuantificar esos efectos se utilizó la modelación matemática hidrodinámica. En las secciones siguientes se presentan y analizan los cambios previstos, determinados en base a la modelación.

3.2 Modelo hidrodinámico unidimensional

En primer lugar se utilizó el modelo matemático hidrodinámico unidimensional (1D) MOAGAB, desarrollado por el INA en el marco de los estudios para el Plan de Acción ante Emergencias (PAE) de Yacyretá.

El modelo MOAGAB fue implementado en base al software de uso público HEC-RAS². Incluye el tramo del río Paraná desde Posadas-Encarnación – aguas arriba del embalse de Yacyretá – hasta la localidad de Villa Constitución, y el tramo del río Paraguay desde Remanso Castillo – aguas arriba de la localidad de Asunción – hasta su confluencia con el río Paraná (**Figura 3.1**).

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

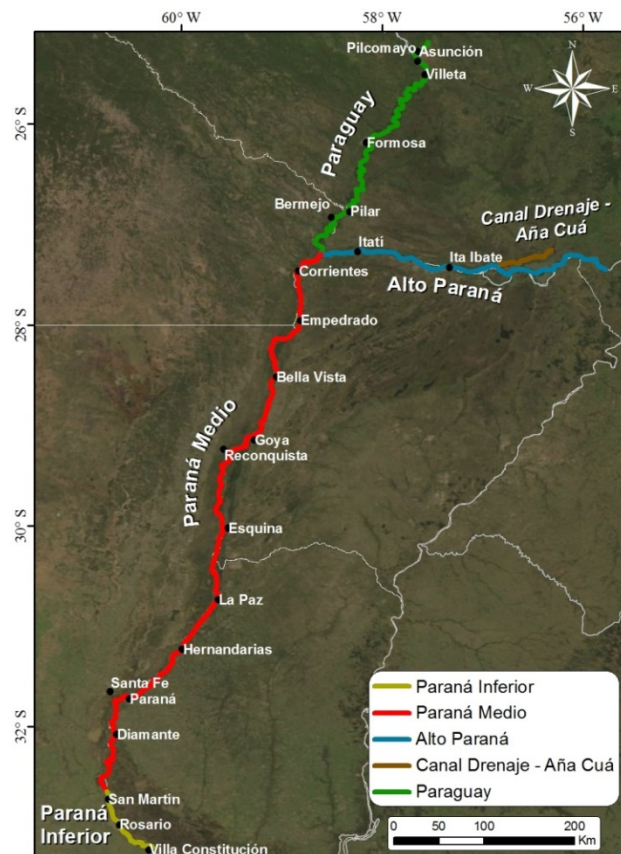


Figura 3.1. Dominio del modelo MOAGAB.

Para el tramo del río Paraná que se extiende desde aguas abajo del cierre de Yacyretá hasta la confluencia con el río Paraguay, que es el más relevante a los fines del presente estudio, las secciones transversales del modelo se construyeron en base a dos fuentes de información: (i) en el sub-tramo desde el cierre de Yacyretá hasta Itatí se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) generado durante el PAE, que incluye información topobatemétrica de detalle (**Figura 3.2**); (ii) en el sub-tramo entre Itatí y Confluencia no se dispone de un MDE del cauce, por lo que se utilizaron las secciones transversales utilizadas en el *Modelo Hidrodinámico del río Paraná para Pronóstico Hidrológico (MHP/PH)* implementado en el INA con el sistema EZEIZA V (detalles en Jaime y Menéndez, 1997, Jaime et al., 2000, y García et al., 2012) ensambladas con cortes del MDE del terreno para representar a las planicies de inundación (**Figura 3.3**).

Este modelo fue calibrado sobre la ventana de tiempo que se extiende entre el 1 de enero de 1995 y el 30 de setiembre de 2014 (algo menos de 20 años). A título ilustrativo, la **Figura 3.4** presenta la comparación entre observaciones y simulación para ese período, observándose un acuerdo muy satisfactorio.

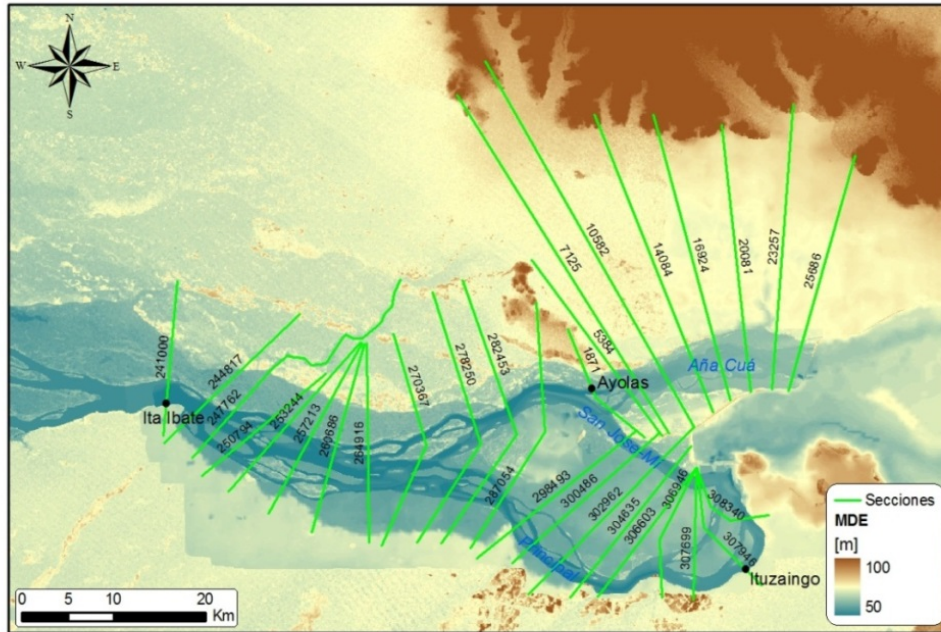


Figura 3.2. Ubicación de secciones transversales para el tramo Central – Ita Ibaté - modelo INA PAE.

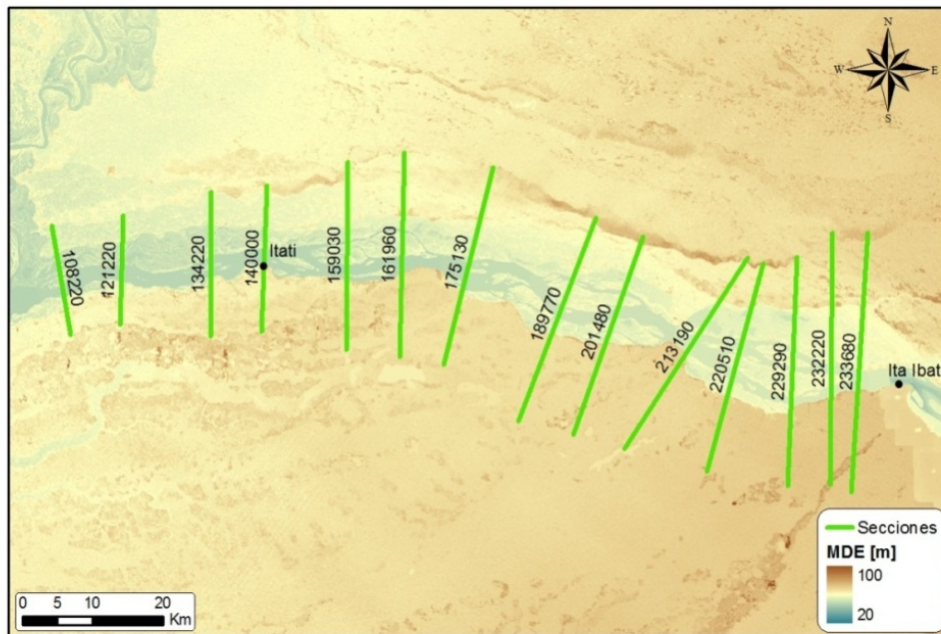
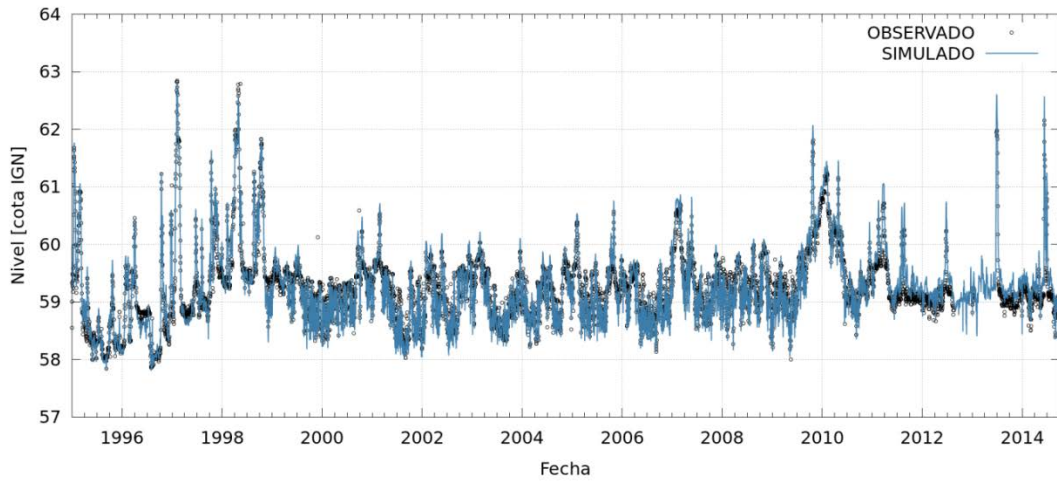
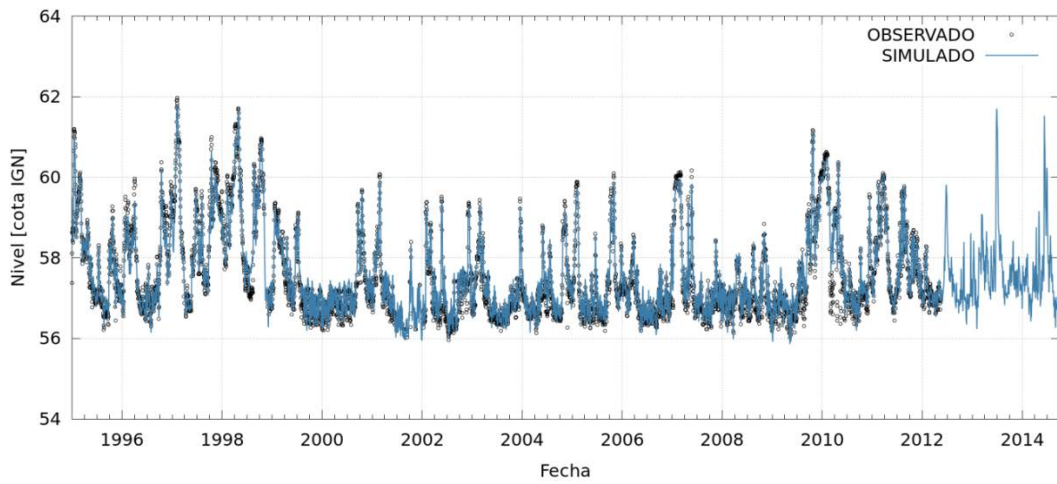


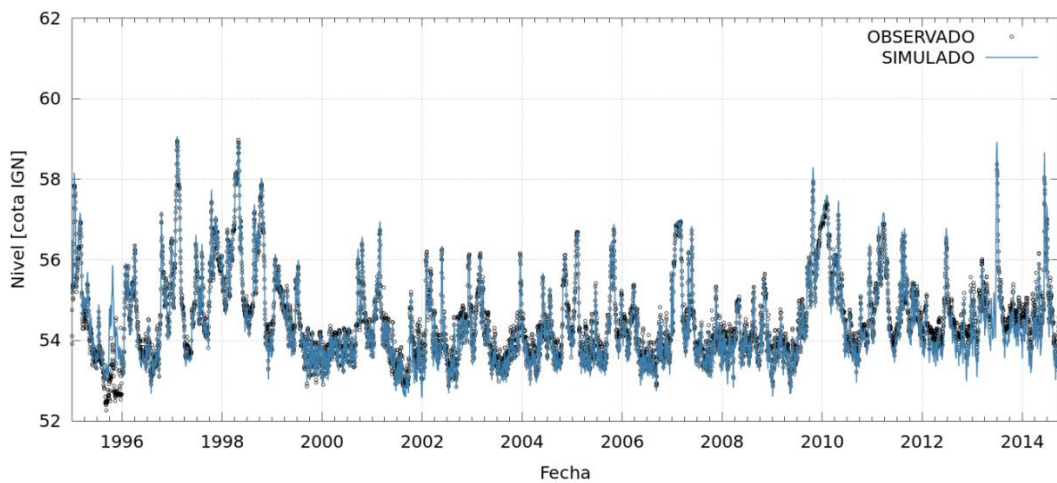
Figura 3.3. Ubicación de secciones transversales para el tramo Ita Ibaté – Confluencia.



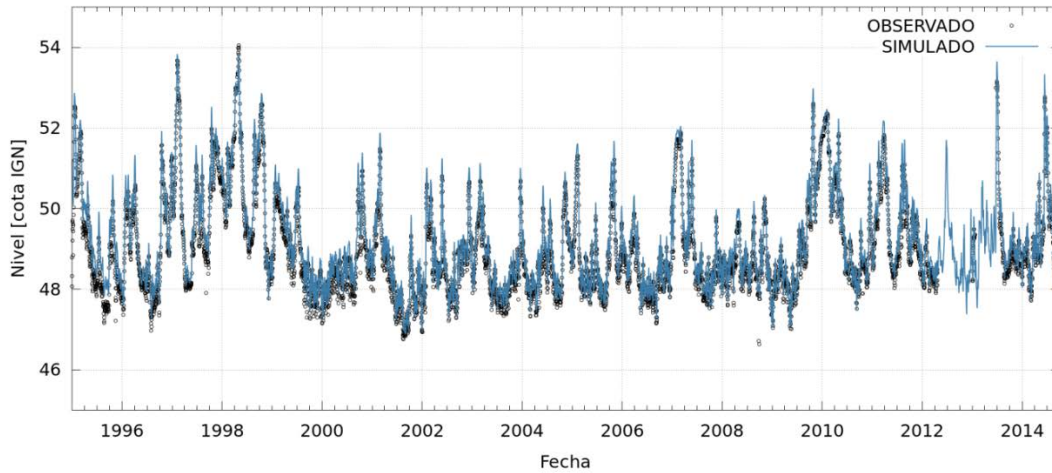
a) Ituzaingó



b) Ayolas



c) Ita Ibaté



d) Itatí

Figura 3.4. Comparación entre niveles simulados y observados con el modelo MOAGAB para la ventana de tiempo de calibración en diferentes estaciones hidrométricas.

La **Tabla 3.1** muestra los indicadores de bondad de ajuste, a saber, Diferencia de Valores Medios (*MED*), Raíz del Error Cuadrático Medio (*RMSE*), Coeficiente de Determinación (R^2) e Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (*NSE*).

Tabla 3.1. Indicadores de bondad de ajuste para la calibración del modelo MOAGAB.

Estación	<i>MED</i> (m)	<i>RMSE</i> (m)	R^2	<i>NSE</i>
Ituzaingó	0.01	0.04	0.92	0.93
Ayolas	0.06	0.06	0.95	0.96
Italbaté	-0.08	0.07	0.94	0.95
Itatí	0.22	0.08	0.95	0.98

3.3 Escenarios de obra

Se estudiaron cuatro alternativas de cierre para Itatí-Itacorá. Las características de estos cierres se presentan en la **Tabla 3.2**. La traza de cada uno se presenta en forma gráfica en la **Figura 3.5**.

Tabla 3.2. Alternativas de cierre para Itatí-Itacorá.

Cierre	Progresiva del cierre (según modelo)	Longitud del cierre frontal (Km)	Longitud del cierre lateral (Km)
Alternativa 1A	916.000	14,5	41,5
Alternativa 1B	916.000	14,5	76,9
Alternativa 2A	932.000	15,9	17,5
Alternativa 2B	932.000	14,5	56,0

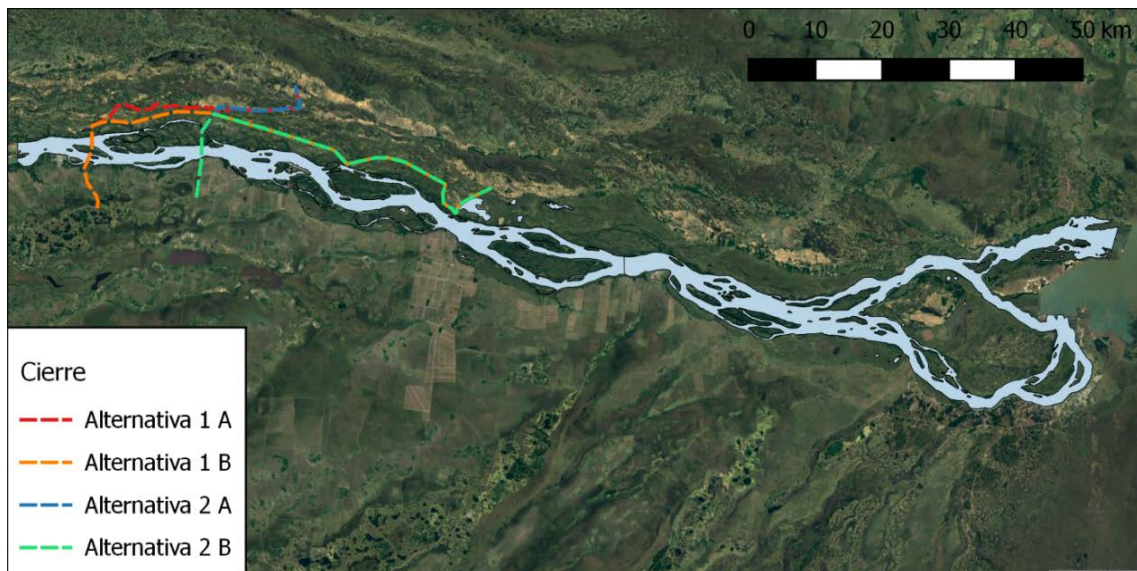


Figura 3.5. Alternativas de cierre para Itatí-Itacorá.

Cada alternativa de cierre fue representada en el modelo HEC-RAS como una estructura en línea ubicada en la progresiva del cierre frontal, consistente en una presa de nivel suficientemente alto y una única compuerta de grandes dimensiones, y un dique lateral cuya posición en cada sección fue ajustada siguiendo el perfil de los cierres laterales. La política de operación de la compuerta ubicada en el cierre fue definida de modo de mantener un nivel de la superficie libre constante en la sección del cierre, con un error menor a 1 cm.

3.4 Modelo hidrodinámico bidimensional

El modelo 1D construido para el PAE de Yacyretá no tenía como objetivo la representación de los niveles de restitución de la Central. Por lo tanto, el Brazo San José Mí se trató en conjunto con el Brazo Principal, y la rugosidad de ambos se calibró de manera de reproducir los niveles en Ituzaingó. En consecuencia, este modelo no logra reproducir con precisión los niveles al pie de la Central.

A fin de estudiar el efecto del cierre Itatí-Itacorá sobre la restitución de la Central se recurrió al modelo bidimensional (2D) de la zona de aguas abajo de Yacyretá desarrollado durante los estudios para el PAE (**Figura 3.6**). Dicho modelo fue construido utilizando el mismo MDE del terreno del cual se extrajeron las secciones del modelo 1D, representado en la **Figura 3.7**. En el borde de aguas abajo se impuso como condición de contorno el nivel de la superficie libre extraído del modelo 1D para cada escenario en la sección correspondiente.

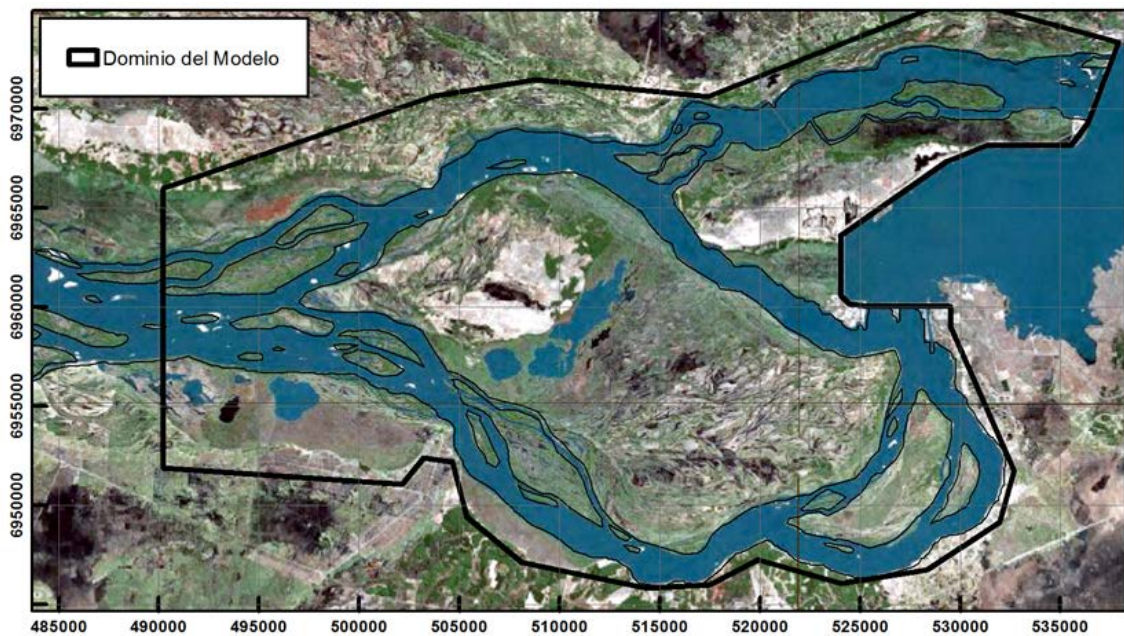


Figura 3.6. Dominio del modelo bidimensional.

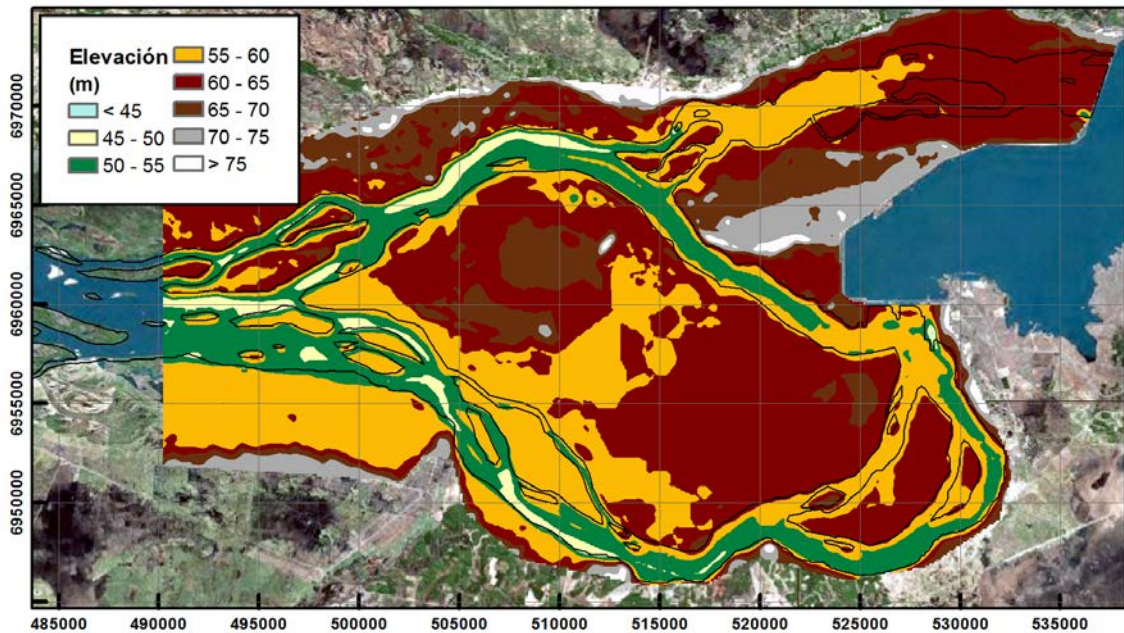
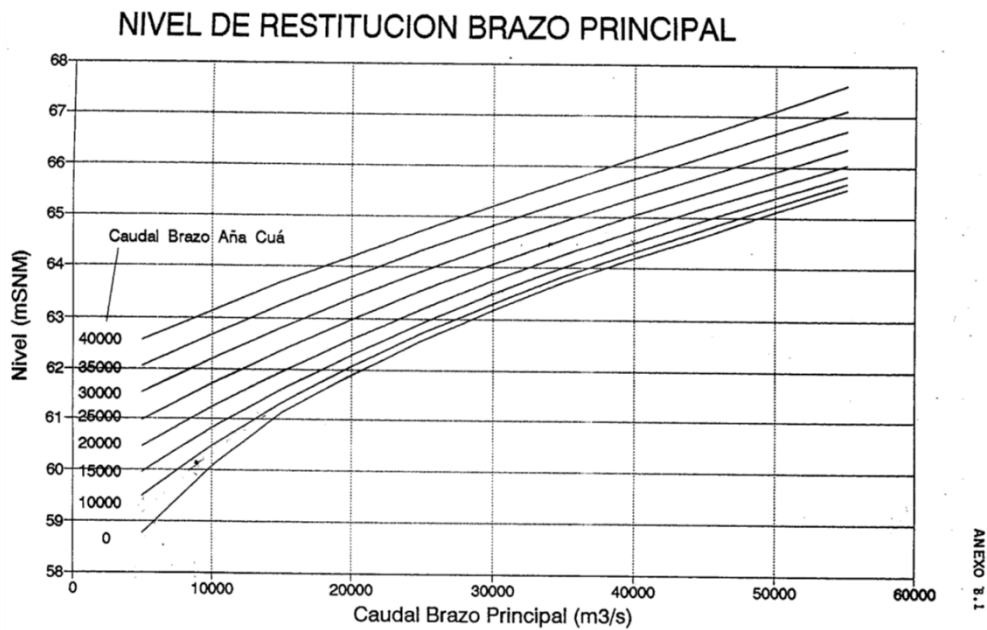


Figura 3.7. Modelo digital de elevación para el modelo bidimensional.

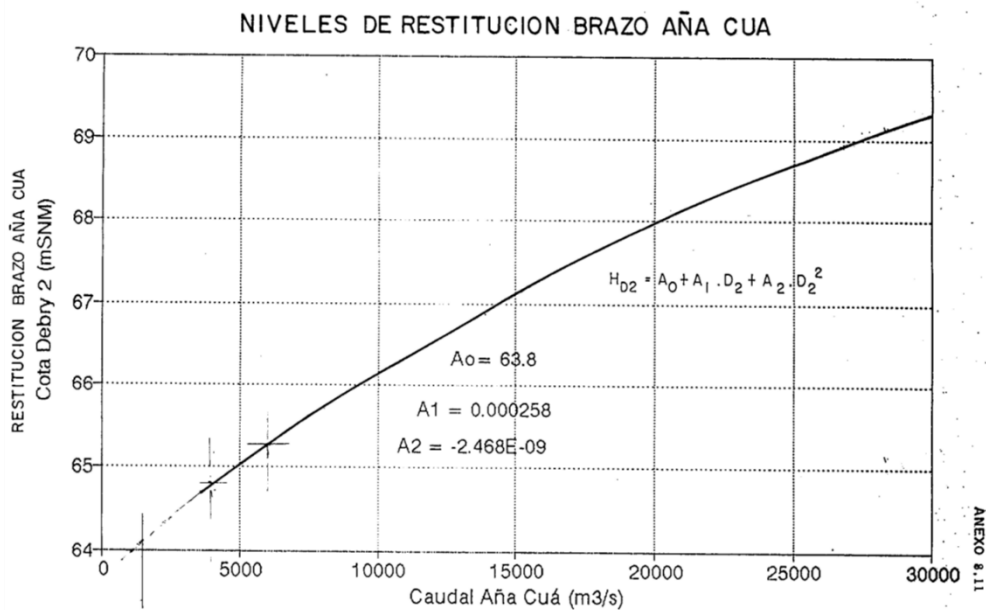
3.5 Relación altura-caudal en la restitución de Yacyretá

Del Manual de Operación y Mantenimiento de Yacyretá se obtuvieron las curvas de restitución actuales de la Central y del vertedero del Brazo Aña Cuá (**Figura 3.8**). Estas fueron construidas por ajuste de datos observados en sendas reglas. En el caso de la Central, en realidad se trata de una familia de curvas, ya que el nivel de restitución depende no solo del caudal vertido por el Brazo Principal, sino también del vertido por el Brazo Aña Cuá. Dado que en todos los ensayos del modelo se utiliza la partición de caudales por brazo definida en el Manual de Operaciones, de la familia de curvas se extrajo la única curva resultante de aplicar dicha partición de caudales.

Se utilizó el modelo 2D para estudiar el efecto del cierre Itatí-Itacorá en la restitución de la Central. Para mejorar el máximo posible la representación de las curvas de restitución en condiciones actuales, se ajustó el valor del coeficiente de rugosidad de Manning en la zona del curso de agua y en la zona de islas, adoptándose finalmente valores de 0,030 y 0,035, respectivamente.



ANEXO 8.1



ANEXO 8.11

Figura 3.8. Curvas de restitución actuales de Yacyretá según su Manual de Operación y Mantenimiento.

En la **Figura 3.9** y la **Figura 3.10** se presenta la comparación entre las curvas de restitución actuales simuladas con el modelo 2D para cada brazo, comparadas con las curvas de ajuste provistas en el Manual de Operación y Mantenimiento. Se observa un muy buen acuerdo para caudales bajos, con algún apartamiento para caudales muy altos que llega hasta aproximadamente 0,35 m en el caso del caudal máximo simulado, de 45.000 m³/s. Estas desviaciones se consideran aceptables, teniendo en cuenta tanto los errores implícitos en las curvas de ajuste, como por el hecho de que la permanencia de altos caudales es relativamente baja, por lo que su incidencia sobre el cálculo del impacto energético es también muy baja.

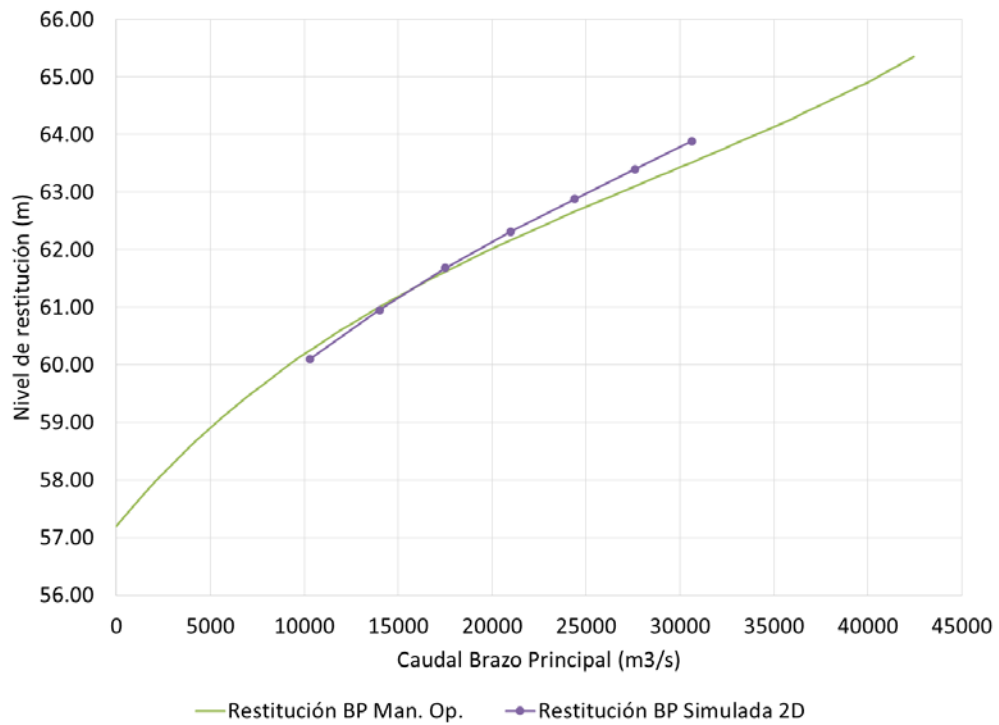


Figura 3.9. Comparación de la curva de restitución simulada para el Brazo Principal con la presentada en el Manual de Operación de Yacyretá

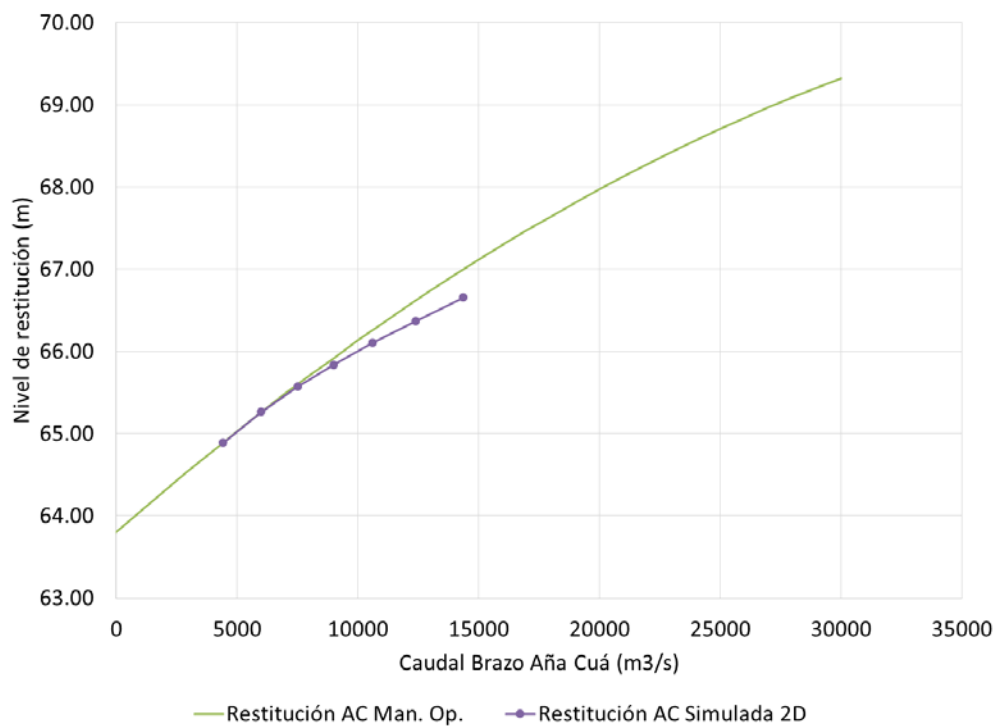


Figura 3.10. Comparación de la curva de restitución simulada para el Brazo Aña Cuá con la presentada en el Manual de Operación de Yacyretá

Una vez calibrado el modelo 2D, se ensayaron escenarios incluyendo el remanso de Itatí-Itacorá. Para ello sólo fue necesario imponer el nivel de agua correspondiente en el borde de aguas abajo. Es pertinente comentar que el mantener el valor de calibración del coeficiente de rugosidad de Manning en la zona de islas implica no considerar un eventual efecto de suavizado de la textura (reducción de rugosidad) por deforestación. En este sentido, el impacto simulado puede considerarse ligeramente conservador.

En la **Figura 3.11** se presenta la curva de restitución del Brazo Principal, tanto en condiciones actuales como con el cierre Itatí-Itacorá a cotas 59 m y 61 m. Si bien los cálculos fueron realizados para la Alternativa 1A de cierre, pueden considerarse representativos de cualquiera de las alternativas. Para caudal medio se observa un aumento de niveles de aproximadamente 0,75 m para el cierre a 59 m, y de 1,75 m para el cierre a 61 m. Para el caudal de crecida estas sobreelevaciones se reducen a 0,40 m y 0,75 m, respectivamente.

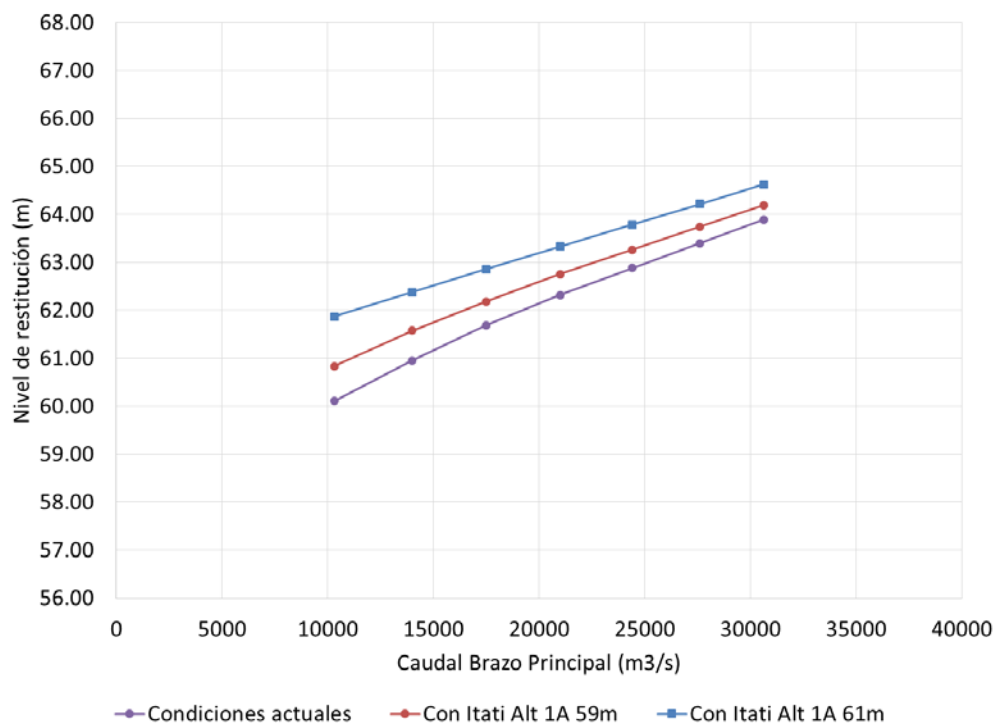


Figura 3.11. Efecto del cierre Itatí-Itacorá sobre la curva de restitución del Brazo Principal.

En la **Figura 3.12** se presenta la misma comparación al pie del vertedero Aña Cuá. Se observa en este caso que no habría impacto de Itatí-Itacorá. Esto se debe a la relativamente alta pendiente del Brazo Aña Cuá.

Como complemento, se repitió el análisis del Brazo Principal para varias cotas intermedias de embalse: 59,5 m, 60,0 m y 60,5 m. Los resultados se presentan en la **Figura 3.13**.

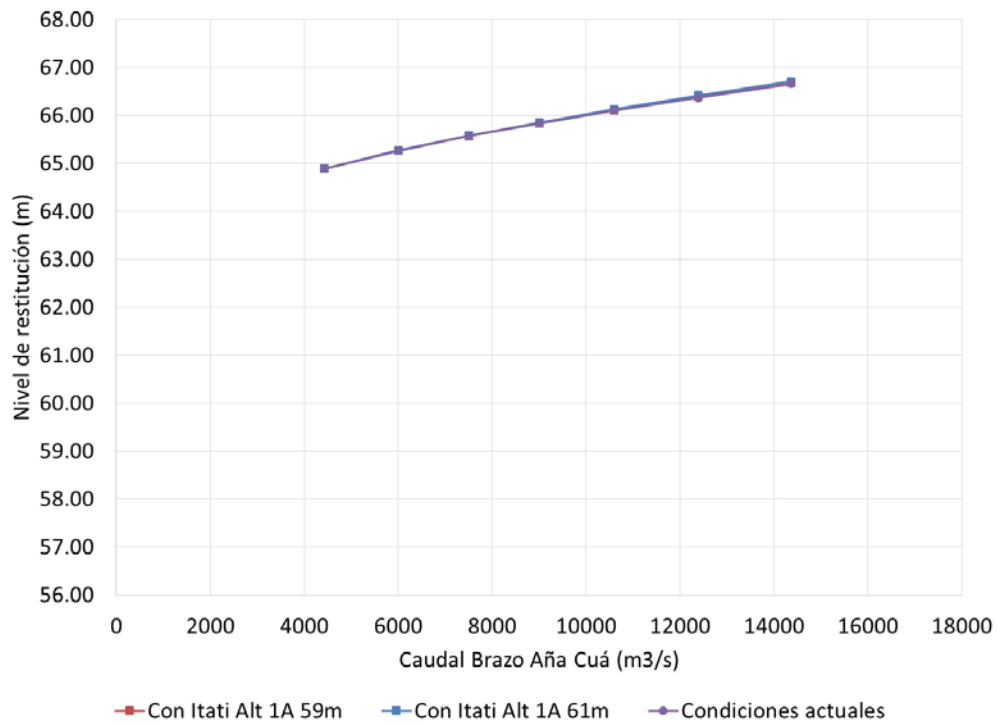


Figura 3.12. Efecto del cierre Itatí-Itacorá sobre la curva de restitución del Brazo Aña Cuá.

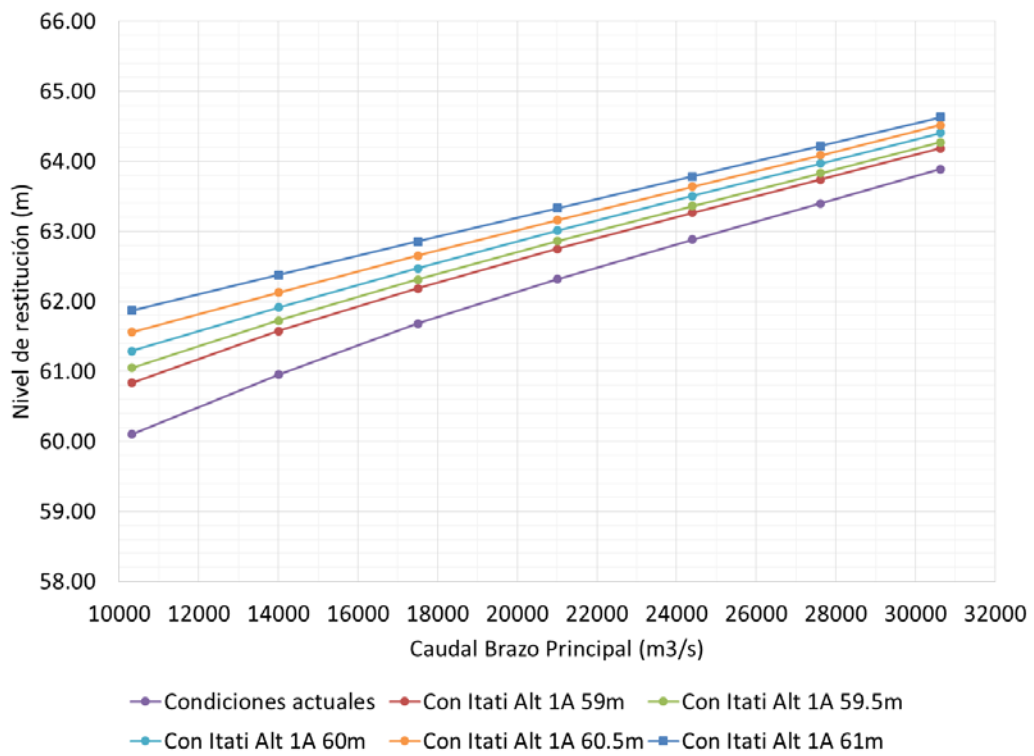


Figura 3.13. Efecto del cierre Itatí-Itacorá sobre la curva de restitución del Brazo Principal.

3.6 Perfiles Longitudinales

Se realizaron simulaciones con el modelo 1D para obtener los perfiles longitudinales de los niveles sobre el río Paraná, siguiendo eventualmente el Brazo Principal, para las distintas alternativas de obra, los distintos escenarios de caudales y las dos cotas de retenida. Estos se presentan desde la **Figura 3.14** a la **Figura 3.22**. Se observan variaciones menores entre las distintas alternativas para un dado caudal y la misma cota de retenida.

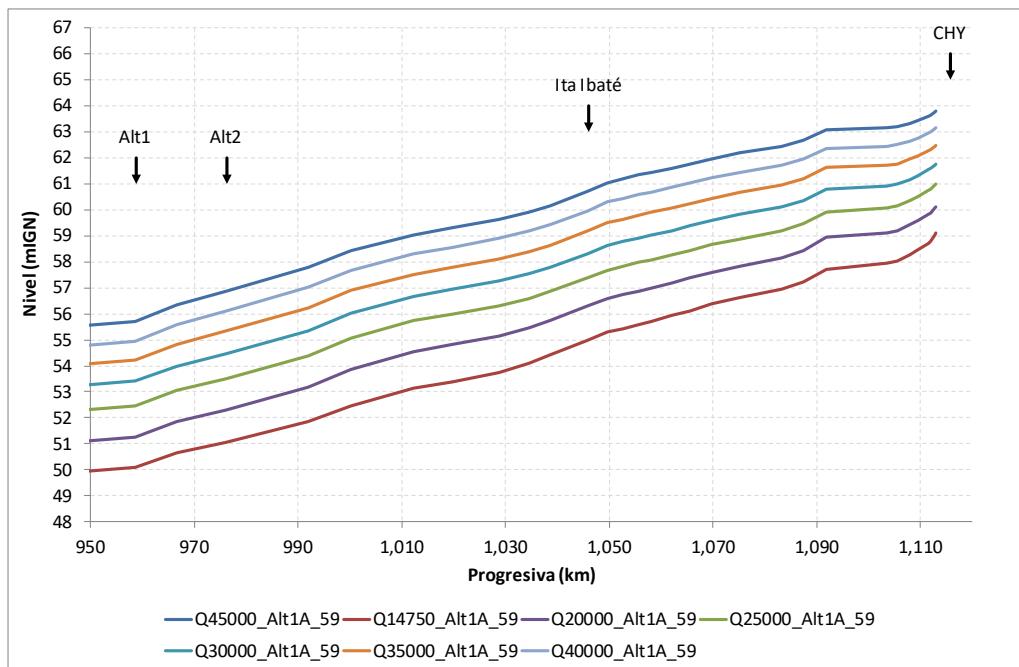


Figura 3.14. Perfil longitudinal con distintos caudales para escenario de condiciones naturales.

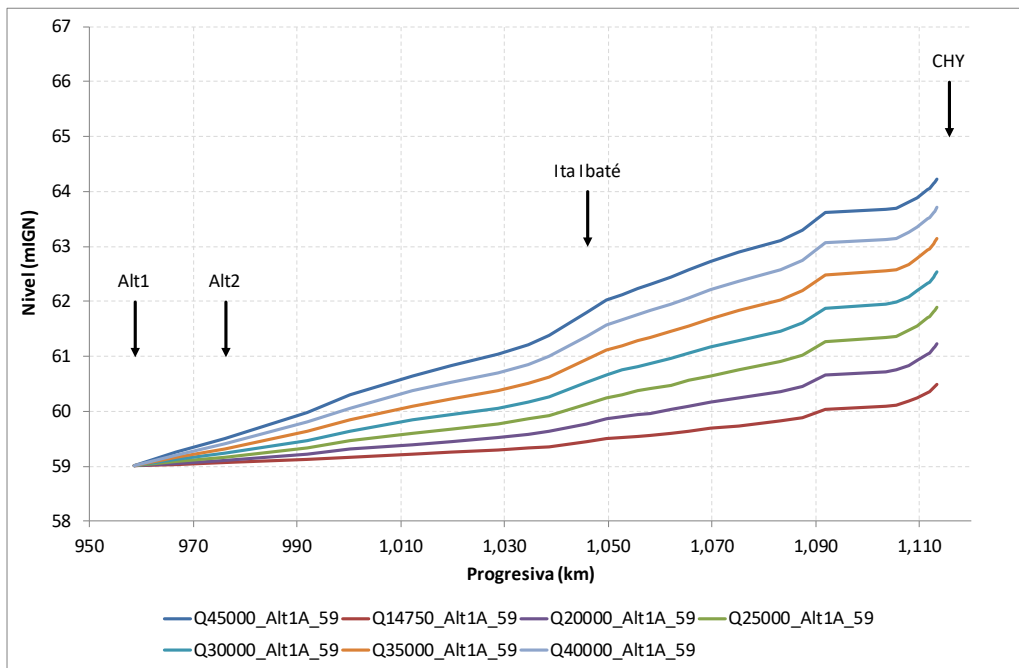


Figura 3.15. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 1A a cota 59 mIGN.

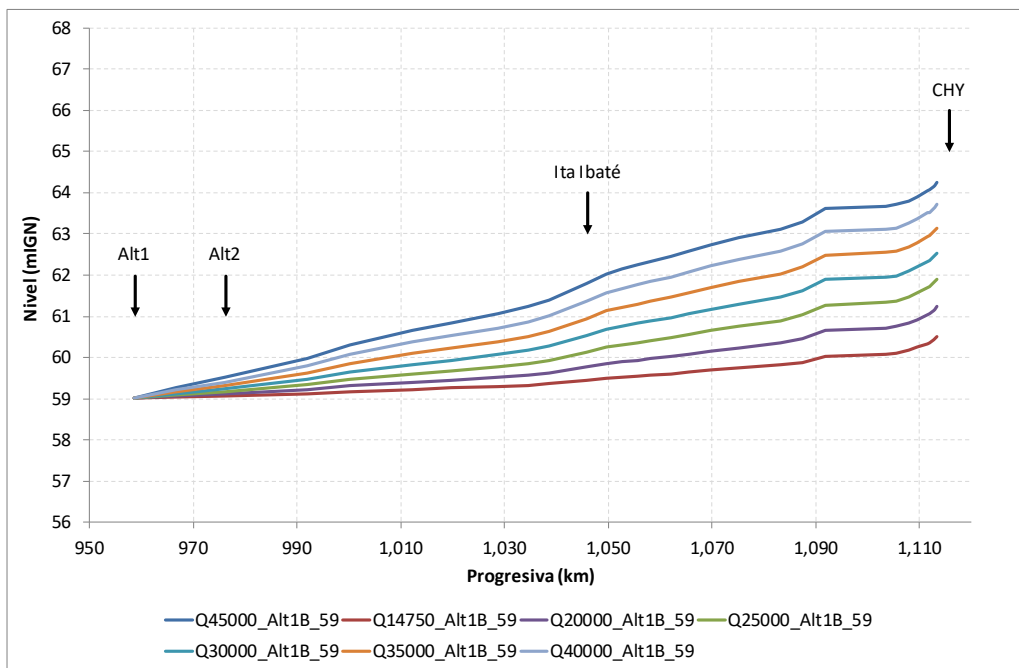


Figura 3.16. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 1B a cota 59 mIGN.

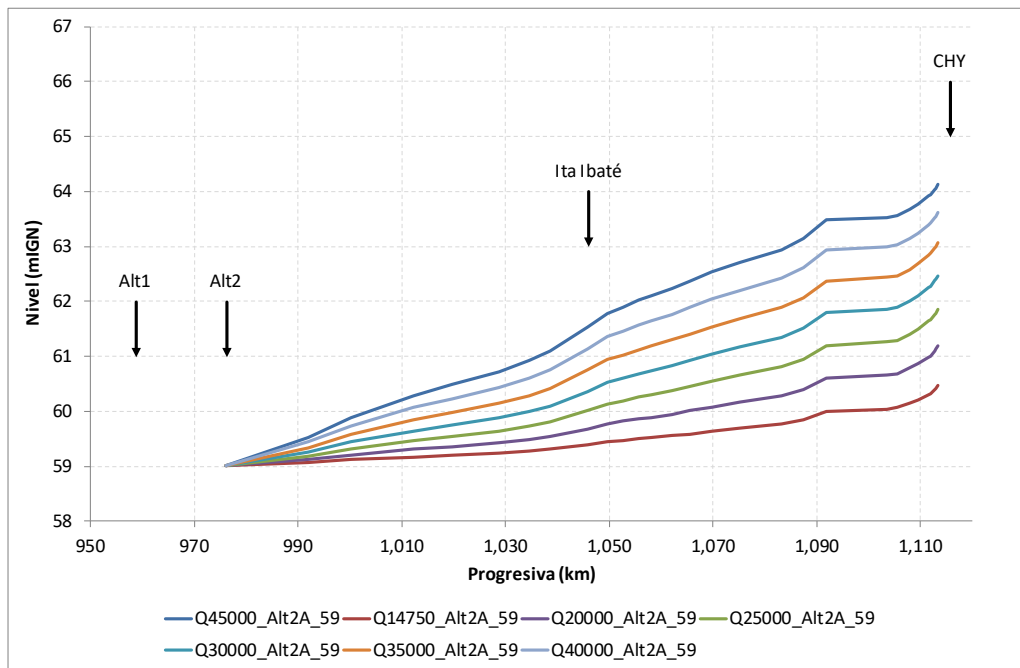


Figura 3.17. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 2A a cota 59 mIGN.

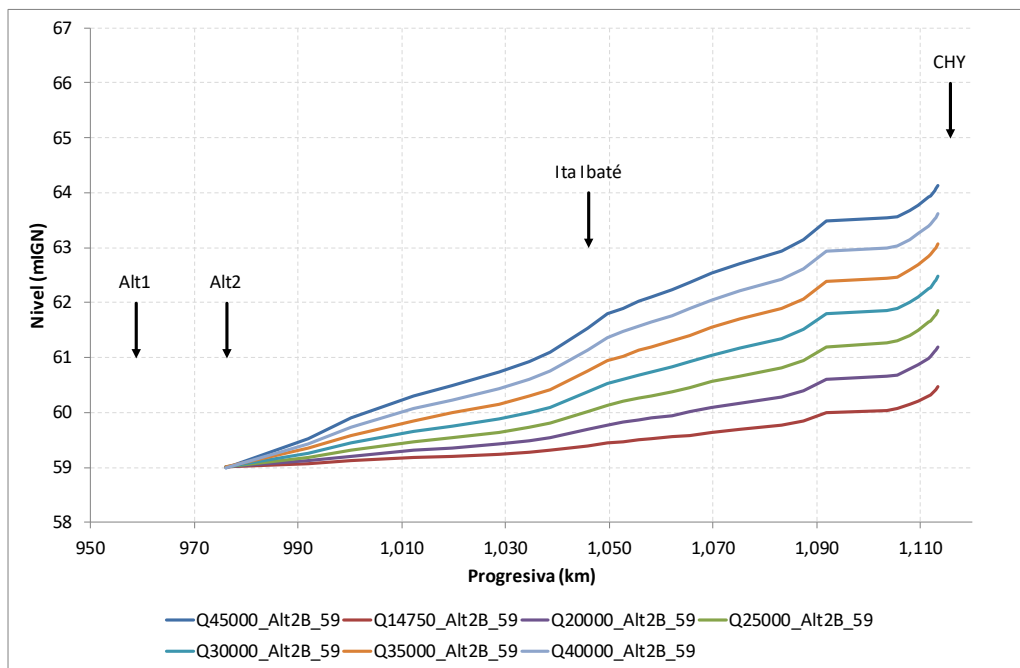


Figura 3.18. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 2B a cota 59 mIGN.

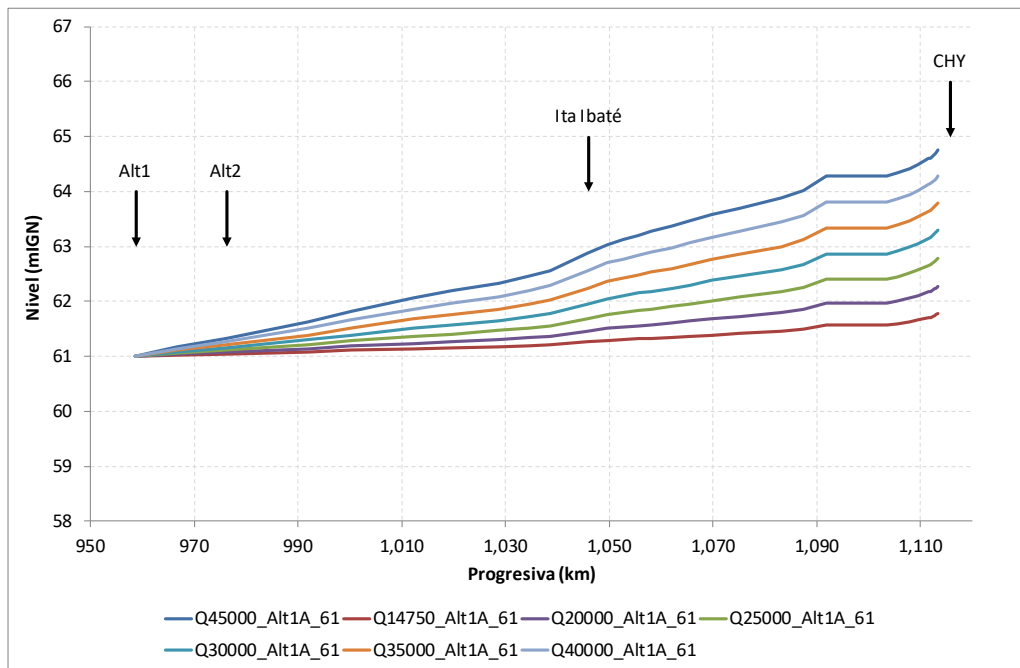


Figura 3.19. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 1A a cota 61 mIGN.

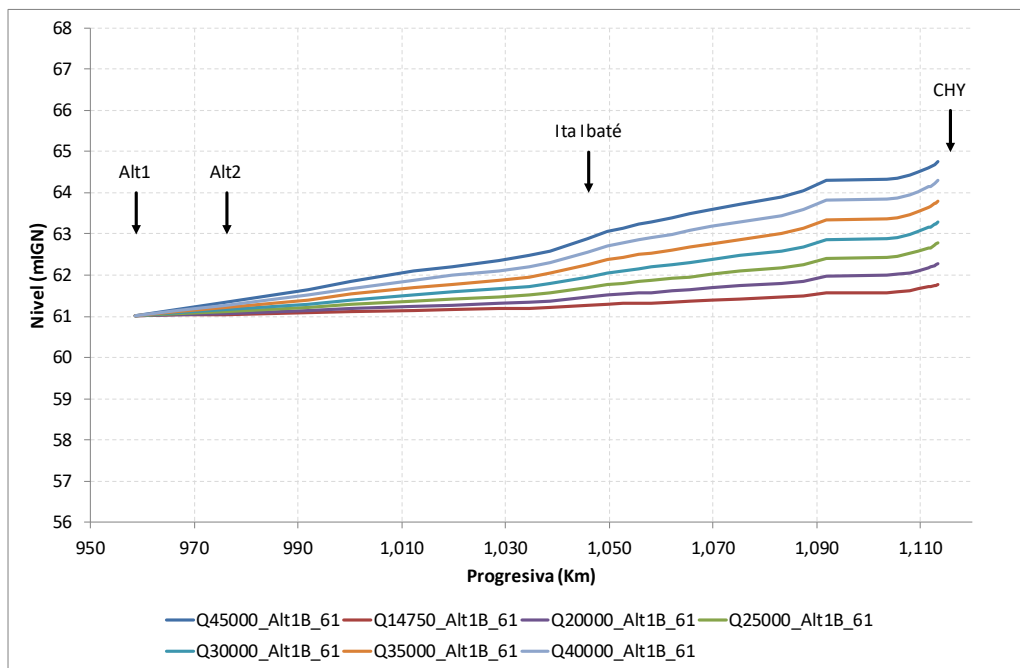


Figura 3.20. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 1B a cota 61 mIGN.

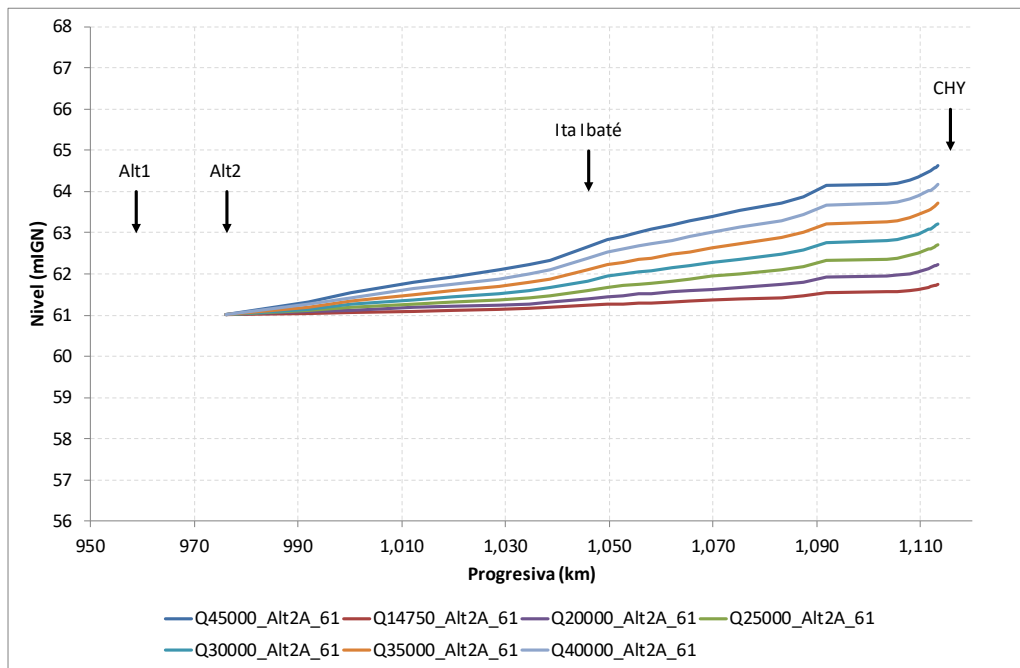


Figura 3.21. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 2A a cota 61 mIGN.

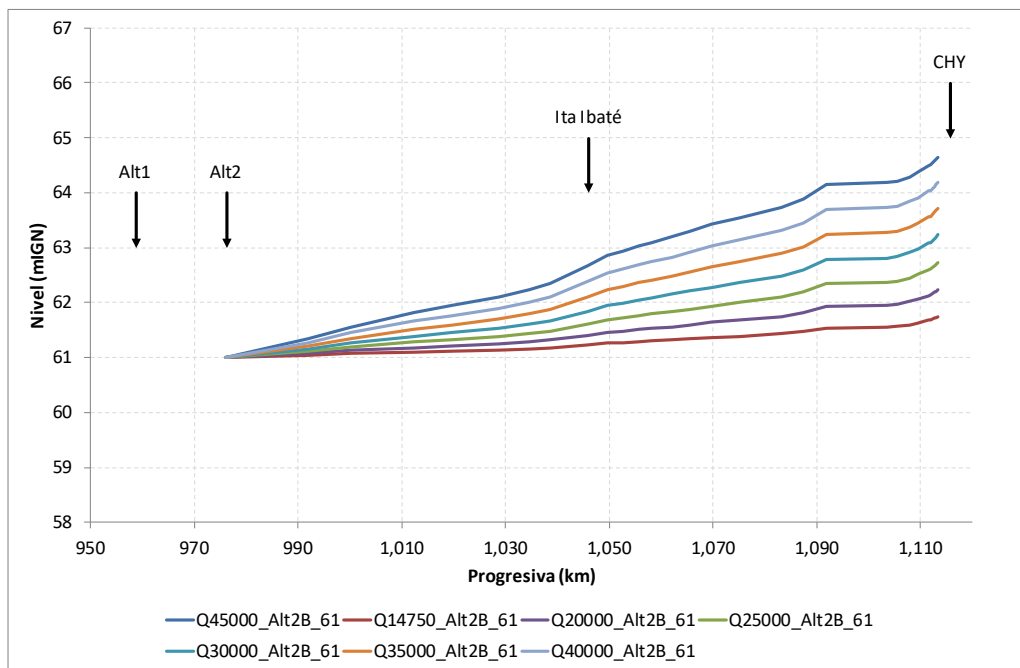


Figura 3.22. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 2B a cota 61 mIGN.

Con el objetivo de mejorar la precisión, se utilizó el modelo 2D para construir los perfiles longitudinales del nivel de agua para las condiciones naturales y en situación con presa para distintos caudales, entre 14.750 m³/s y 45.000 m³/s. En la **Figura 3.23** se muestra la traza de los perfiles para los 3 brazos del río Paraná: brazo Principal, brazo San José Mí y brazo Aña Cuá. Se utilizó como condición de borde de aguas abajo los resultados provistos por el modelo 1D.

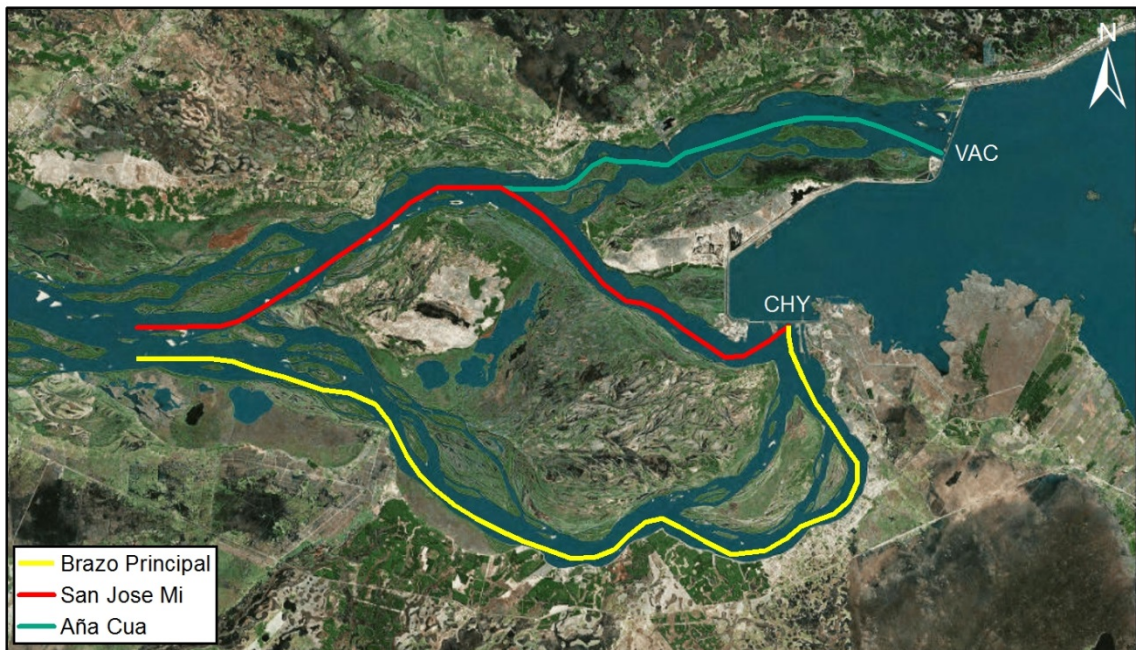


Figura 3.23. Ubicación de los perfiles longitudinales para los 3 brazos.

Los perfiles calculados se presentan en la **Figura 3.24** para la condición natural y la **Figura 3.25** y la **Figura 3.26** para la situación con presa. Se observa que a partir de la progresiva 1.069.800 m se desprenden dos perfiles: el inferior corresponde al Brazo Principal y el superior al Brazo Aña Cuá; este último luego vuelve a dividirse entre el Brazo Aña Cuá, el superior, y el San José Mí, el inferior. Se observa que los niveles en la restitución del Vertedero del Brazo Aña Cuá no se ven influenciados por los niveles de la presa de Itatí (no hay efectos de remanso).

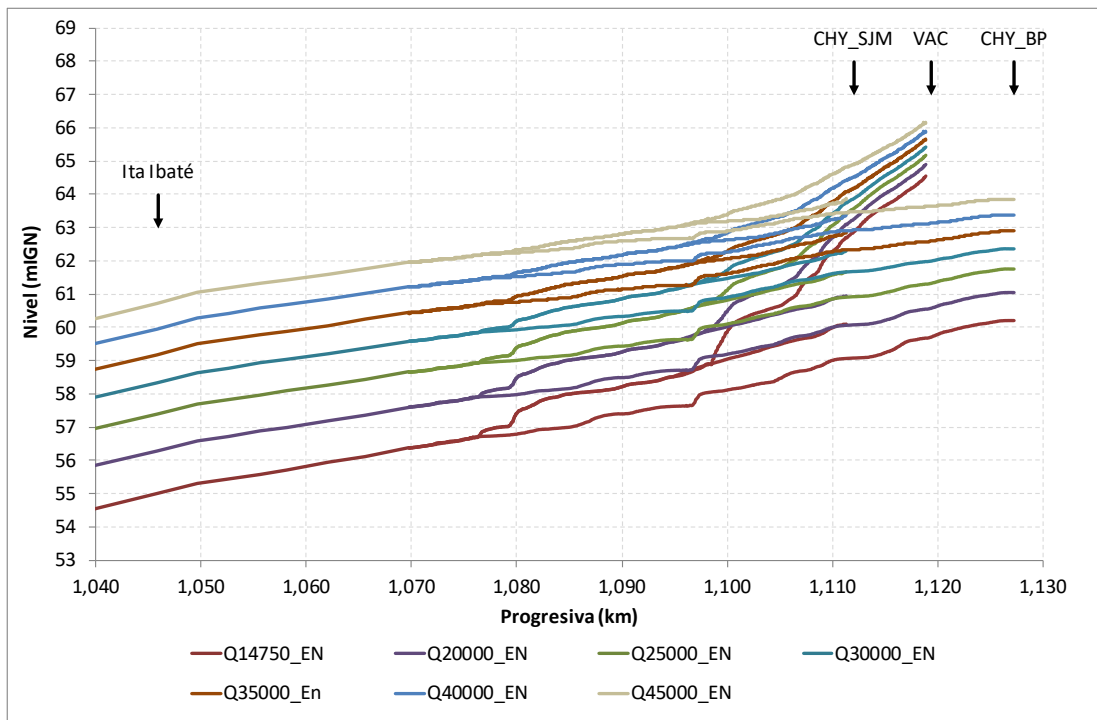


Figura 3.24. Perfiles longitudinales del nivel de agua para el escenario natural, para los brazos Aña Cua, San Jose Mí y Brazo Principal.

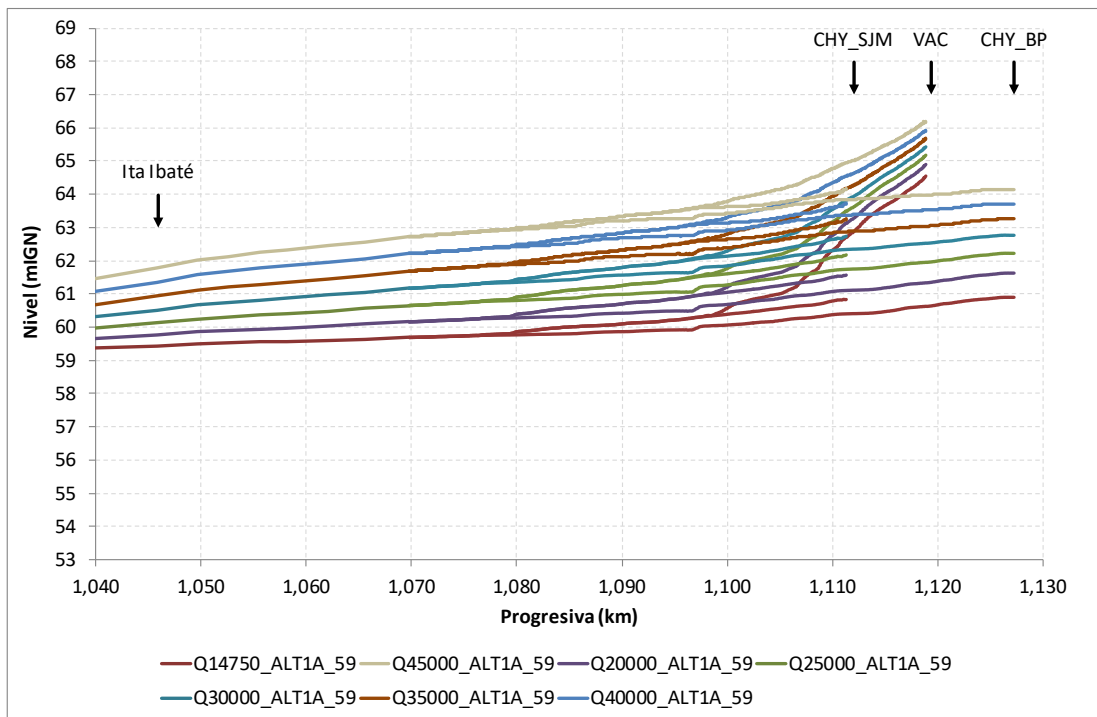


Figura 3.25. Perfiles longitudinales del nivel de agua para la Alternativa 1a a cota 59 m, para los brazos Aña Cua, San Jose Mí y Brazo Principal.

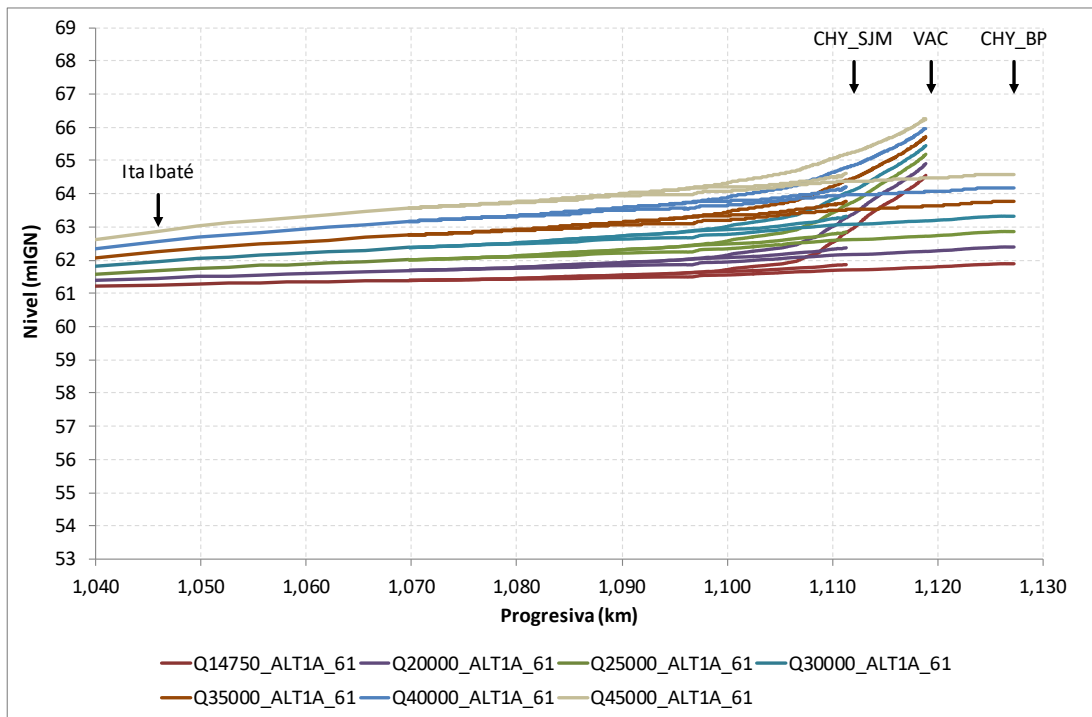


Figura 3.26. Perfiles longitudinales del nivel de agua para la Alternativa 1a a cota 61 m, para los brazos Aña Cua, San Jose Mí y Brazo Principal.

3.7 Crecida Máxima Probable

El caudal pico de la Crecida Máxima Probable (CMP) para la presa de Yacyretá fue establecido en 95.000 m³/s. Dadas las características actuales de operación de Yacyretá, puede considerarse que esta crecida no sería laminada. Por su parte, la futura presa de Itatí podría tener la capacidad de laminarla para atenuar ese caudal pico a 91.000 m³/s.

Se realizaron ensayos con el modelo 1D para determinar los perfiles longitudinales asociados a la CMP correspondiente a las distintas alternativas de cierres, considerando la situación de laminación y de no laminación. Para los caudales analizados los vertederos funcionan en una condición ahogada, obligando a elevar los niveles NAMO (Niveles de Aguas Máximas de Operación) de 59 m y 61 m y generando las curvas altura-caudal que se presentan en la **Figura 3.27**. Para la Alternativa 2 a cota 59 m el vertedero queda rápidamente ahogado, por lo que se utiliza la misma curva que para la Alternativa 1 a cota 61 m. Los perfiles longitudinales resultantes se presentan en la **Figura 3.28**.

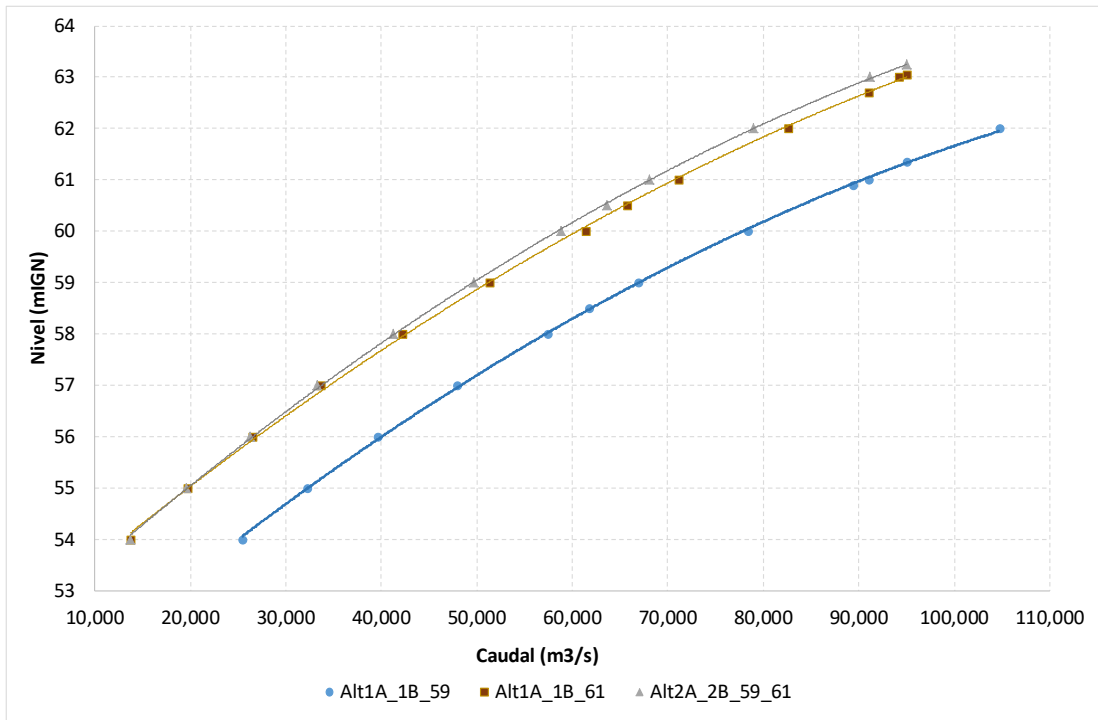


Figura 3.27. Curvas de descarga de los vertederos.

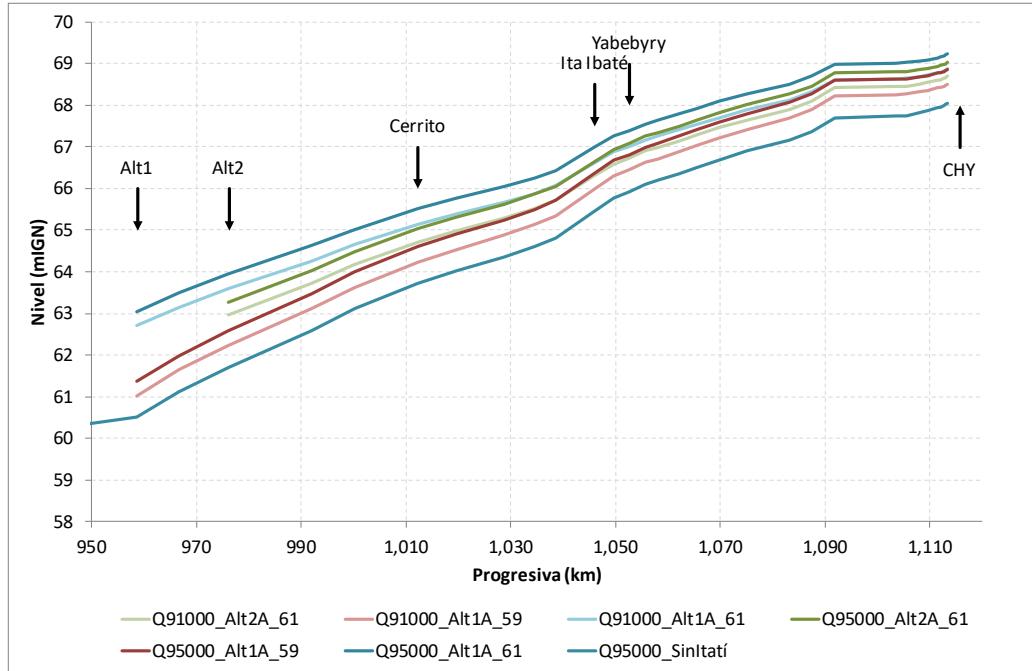


Figura 3.28. Perfiles longitudinales para escenarios con CMP.

3.8 Modelo hidrodinámico 1D con actualización de secciones

Se incorporaron al modelo hidrodinámico 1D las secciones transversales relevadas para el proyecto (ITAIPU, 2017). Se trata de un total de 19 secciones, desde la confluencia del río Paraná con el río Paraguay hasta la confluencia del Brazo Principal con el Brazo Aña Cuá (aguas abajo de Yacretá), tal como se muestra en la **Figura 3.29**.

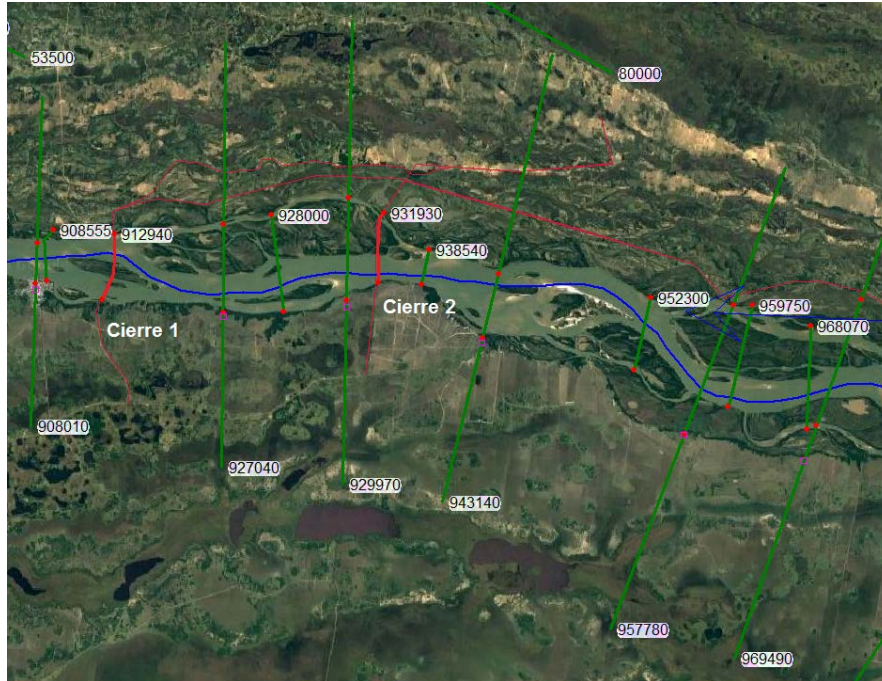


Figura 3.29. Ubicación de las secciones transversales.

3.9 Distribución lateral de caudales en las secciones de cierre

Se utilizó el modelo 1D actualizado para determinar la distribución lateral de velocidades y caudales específicos en las secciones de ambas alternativas de cierre, con el objeto de asistir en el diseño de la ubicación de la central y el vertedero.

La **Figura 3.30** muestra la ubicación de las secciones de las secciones de cierre que fueron especialmente relevadas. Estas se informaron desagregadas en varias subsecciones, numeradas desde margen derecha a margen izquierda. La sección del cierre de la Alternativa 1 está dividida en las siguientes subsecciones (**Figura 3.31**):

- Sección 4 1
- Sección 4 2
- Sección 4 3

En tanto la sección del cierre de la Alternativa 2 está dividida en las siguientes subsecciones (**Figura 3.32**):

- Sección 6 1
- Sección 6 2

- Sección 6 3 (representa un paleo cauce inundado desde aguas abajo, que no fue considerado para este análisis porque no tiene continuidad hacia aguas arriba)
- Sección 6 4

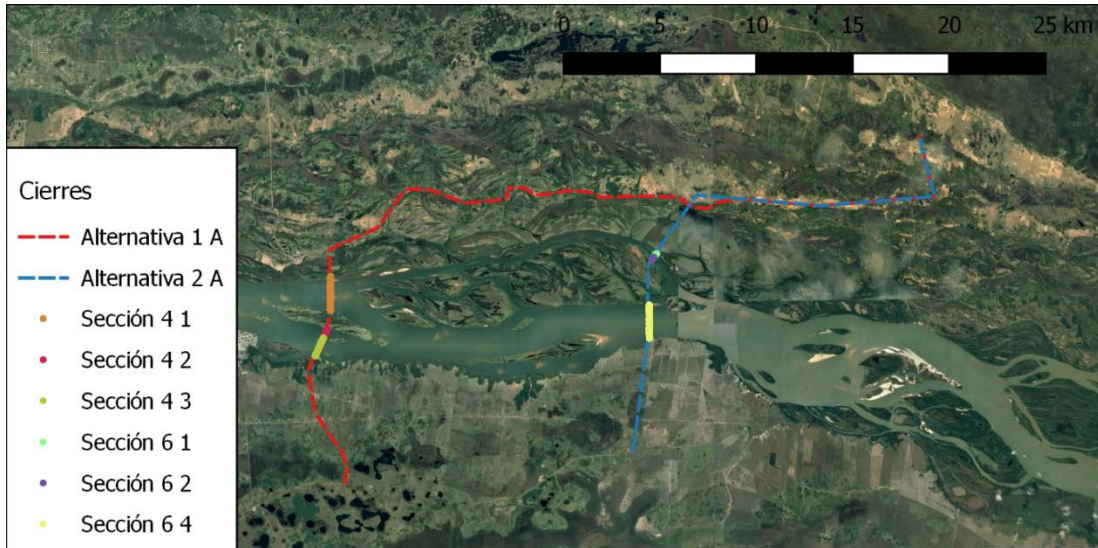


Figura 3.30. Ubicación de los relevamientos batimétricos en las secciones de cierre

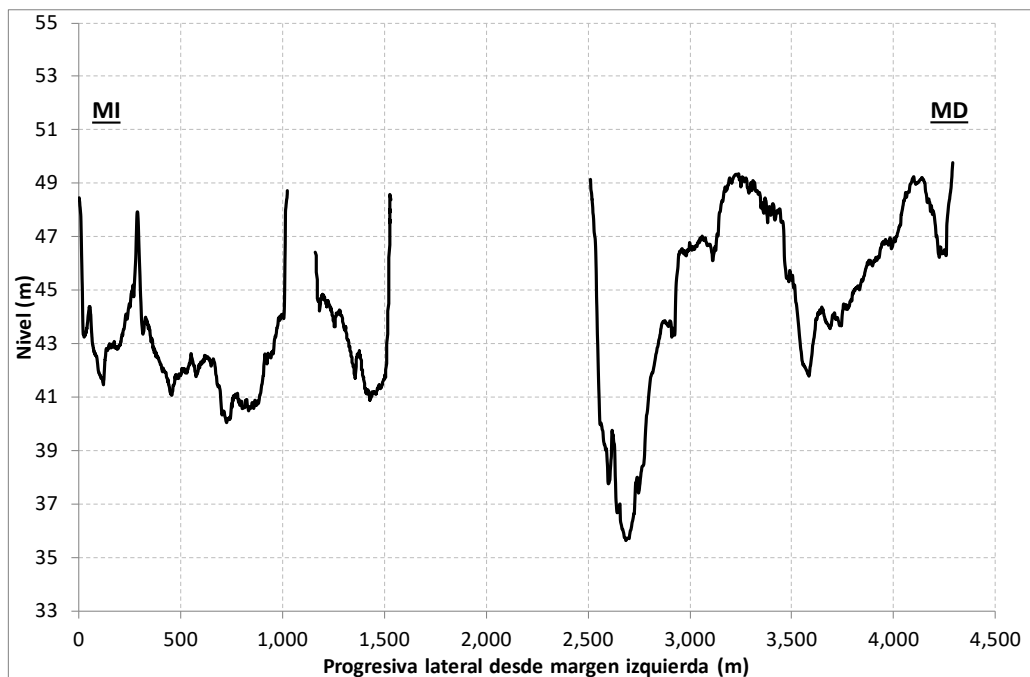


Figura 3.31. Sección de cierre Alternativa 1.

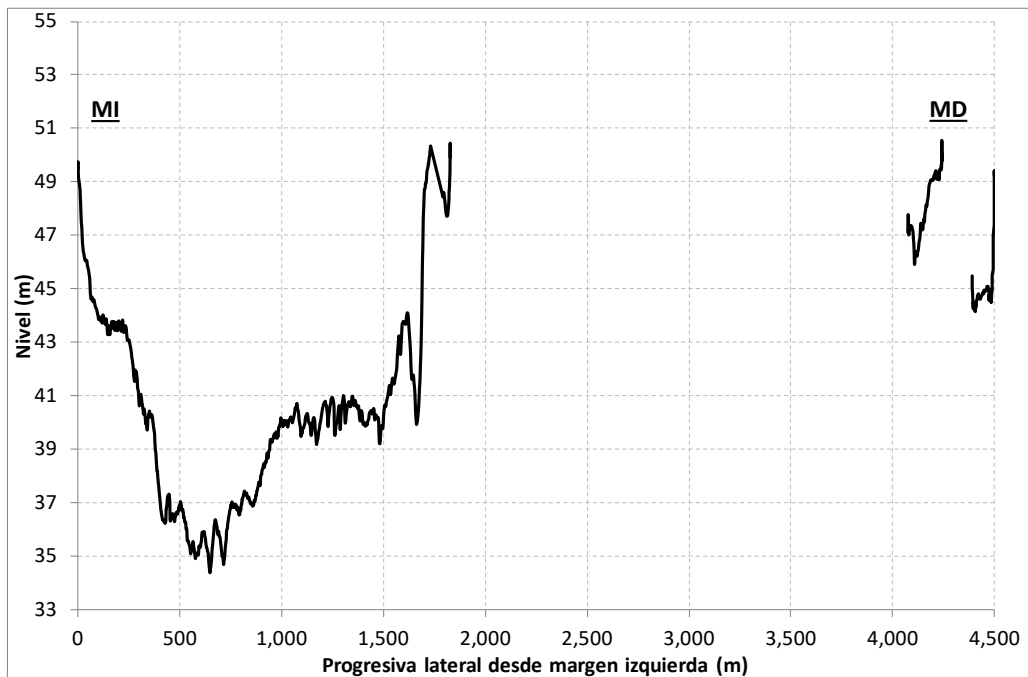


Figura 3.32. Sección de cierre Alternativa 2.

Cada subsección fue tomada como puntos x, y, z. Estos fueron proyectados a un segmento transversal al escurrimiento, obteniendo puntos l, z, donde l es la progresiva lateral.

Para calcular la distribución de caudales se aplicó un modelo de distribución lateral (Weber et al., 2005). En cada sección de cierre se utilizó el nivel de superficie libre obtenido del modelo 1D para condiciones de caudal medio de $14.700 \text{ m}^3/\text{s}$, y un coeficiente de Manning de 0,027, también igual al del modelo 1D. Luego se determinó iterativamente la pendiente de carga necesaria para obtener en cada caso un caudal total en la sección igual a $14.700 \text{ m}^3/\text{s}$.

Los resultados de caudales específicos, así como los caudales totales por subsección, se presentan en la **Figura 3.33** para el cierre de la Alternativa 1 y en la **Figura 3.34** para el cierre de la Alternativa 2.

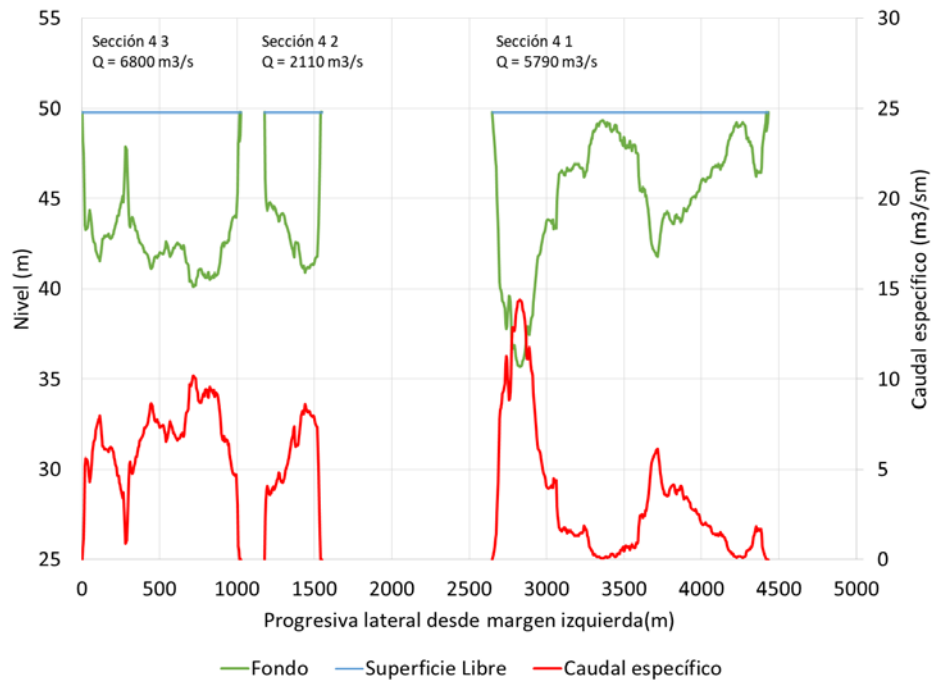


Figura 3.33. Distribución lateral de caudal medio en la sección de cierre de la Alternativa 1

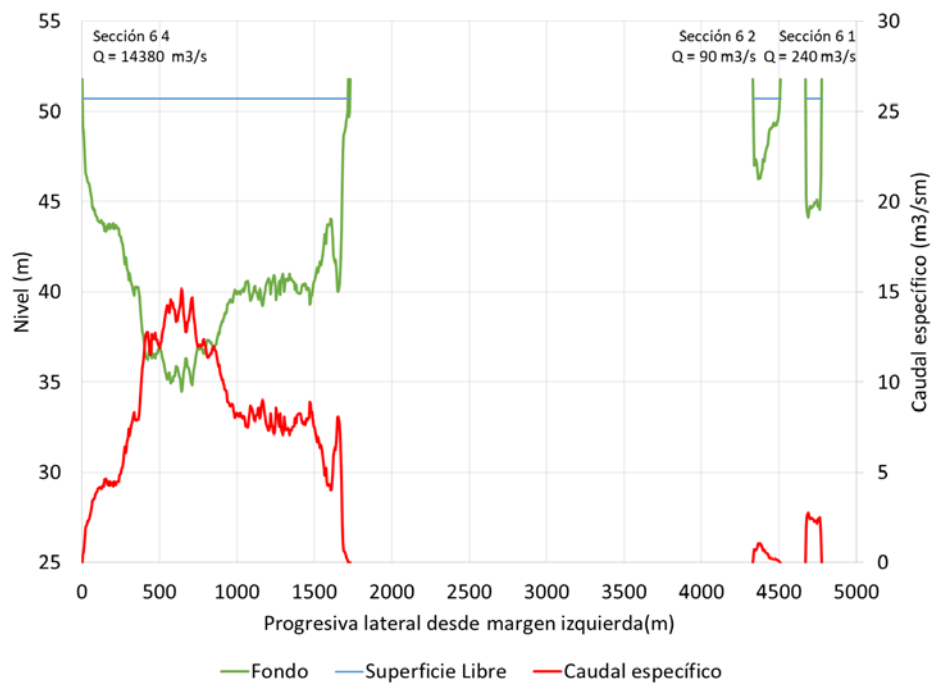


Figura 3.34. Distribución lateral de caudal medio en la sección de cierre de la Alternativa 2

3.10 Navegación

3.10.1 Planteo del problema

Existe una circulación constante de embarcaciones a lo largo del río Paraná en la zona de influencia del proyecto. Por lo tanto, es necesario evaluar las alternaciones que produciría la presencia del embalse de Itatí-Itacorá sobre las condiciones de navegabilidad.

En la **Figura 3.35** se presenta la ubicación de los pasos críticos del río Paraná en el tramo Corrientes – Posadas. Estos pasos no se analizarán de manera pormenorizada, ya que no se cuenta con secciones transversales en estos sitios. No obstante, se presenta un análisis general del tramo hasta Yacyretá, generado mediante la realización de ensayos numéricos para condiciones con y sin proyecto. En la primera serie de ensayos se estudiaron situaciones de caudal constante, mientras que en la segunda se analizó la influencia del empuntamiento.



Figura 3.35. Ubicación de los pasos críticos del río Paraná en el tramo Corrientes - Posadas.

3.10.2 Ensayos a caudal constante

Se adoptó como representativa de la condición con proyecto la alternativa de cierre 1A. Esta se ensayó con las variantes de operación a nivel constante de 59 m y de 61 m utilizando el modelo 1D actualizado.

Se simularon dos condiciones de caudal, la primera correspondiente al caudal de 14.735 m³/s representativo de condiciones medias, y la segunda a un caudal de crecida de 45.000 m³/s.

Para cada una de estos escenarios se calculó la velocidad media en cada sección transversal. Los perfiles de velocidad para la situación sin proyecto y con los dos escenarios de proyecto, se presentan en la **Figura 3.36** para el caudal 'medio' y en la **Figura 3.37** para el caudal de crecida extraordinaria. Tal como era de esperarse, se observa que la construcción del embalse de Itatí-Itacorá, en cualquiera de sus dos niveles de operación, conduciría a la reducción de la velocidad en todo el tramo entre las dos presas para los dos caudales. En el caso del caudal medio, las velocidades se reducen desde valores máximos del orden de 1,0 m/s hasta 0,5 m/s con el embalse a cota 59 m, y hasta 0,4 m/s con el embalse a cota 61 m, es decir, reducciones del orden del 50%. En condiciones de crecida extraordinaria, en tanto, las disminuciones de velocidad son relativamente modestas. Los picos de velocidad se reducen desde 1,3 m/s para la condición sin proyecto hasta valores de 1,2 m/s y 1,1 m/s con el embalse a cotas 59 m y 61 m, respectivamente, es decir, reducciones del orden del 10%.

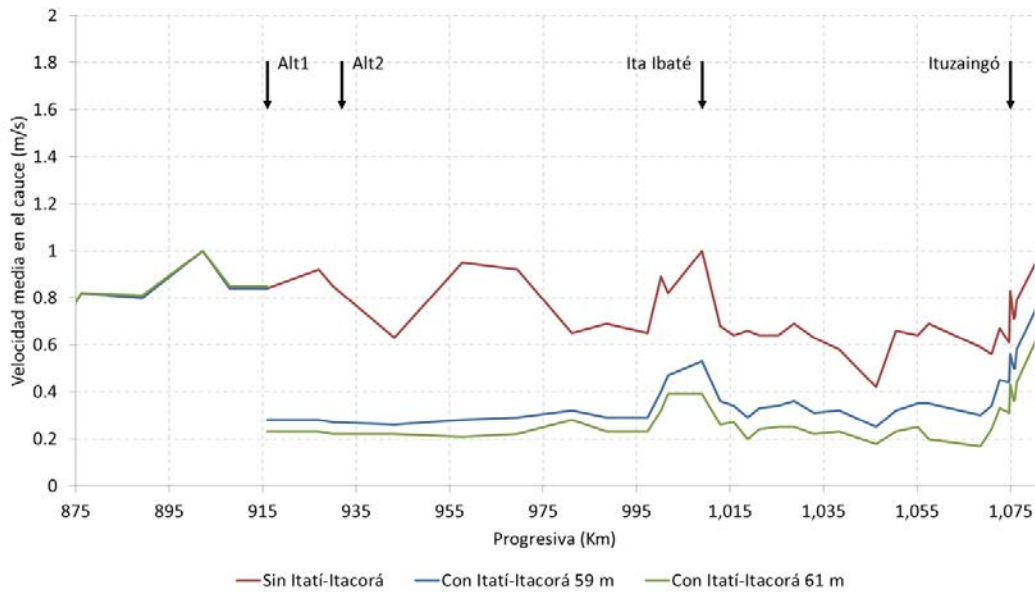


Figura 3.36. Perfil de velocidad para un caudal de $14.735 \text{ m}^3/\text{s}$ en distintos escenarios de proyecto.

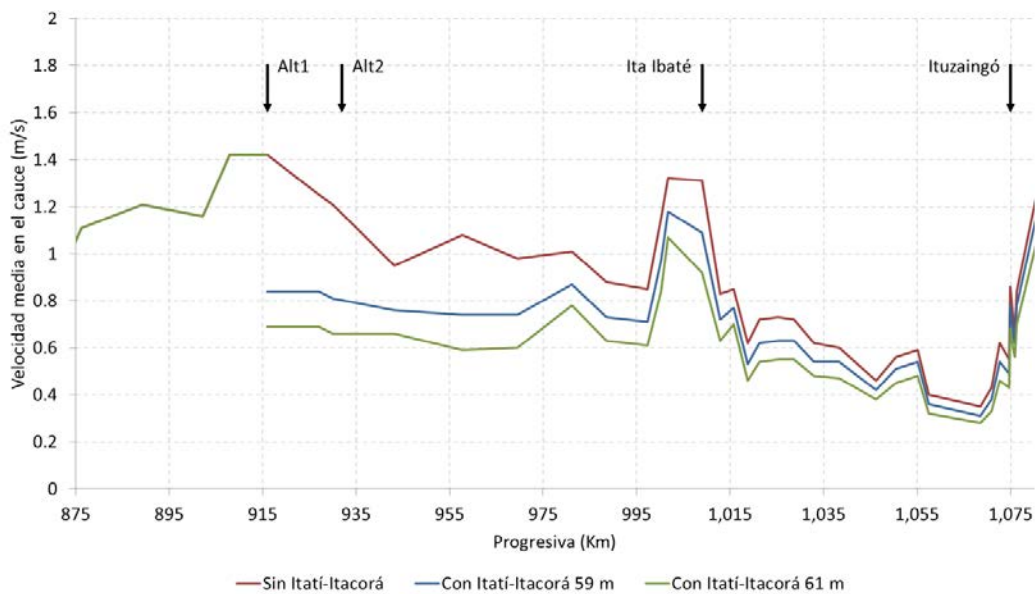


Figura 3.37. Perfil de velocidad para un caudal de $45.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en distintos escenarios de proyecto.

Si bien, según datos suministrados por COMIP, las embarcaciones que transitan este tramo del Paraná encuentran velocidades algo superiores a $1,0 \text{ m/s}$ en el tramo aguas arriba de Santa Ana (Misiones) sin que ello signifique un problema de circulación, la disminución de velocidad durante crecidas extraordinarias por la construcción de Itatí-Itacorá en el tramo hasta Yacyretá podría significar una navegación más segura en esas condiciones.

El modelo también proveyó las profundidades máximas (tirantes) disponibles en cada sección transversal. Si bien estas secciones no necesariamente coinciden con los pasos más críticos del tramo, los resultados son de todos modos indicativos de las variaciones que se producirían respecto de las profundidades actuales. En la **Figura 3.38** se presenta el perfil de tirantes para el caudal medio, y en la **Figura 3.39** para el caudal de crecida extraordinaria. Obviamente, se observa que por el embalse aumentan los tirantes para el tramo entre las dos presas. El cambio relativo es más pronunciado para la condición de caudal medio que para la de crecida, y disminuye hacia aguas arriba. El máximo incremento es del orden del 70% para caudales medios y del 20% para crecidas extraordinarias.

En la **Figura 3.40** se presenta el perfil del aumento de la profundidad respecto de la situación actual para el caudal de 14.735 m³/s, mientras que en la **Figura 3.41** se muestra lo propio para el caudal de 45.000 m³/s. Se observa que esos aumentos llegan a 8 m y 10 m para cotas de embalse de 59 m y 61 m, respectivamente, en el caso de caudal medio, y a valores de 3,3 m y 5,3 m en el caso del caudal de crecida extraordinaria. Obviamente, estos incrementos van el sentido de una navegación más segura.

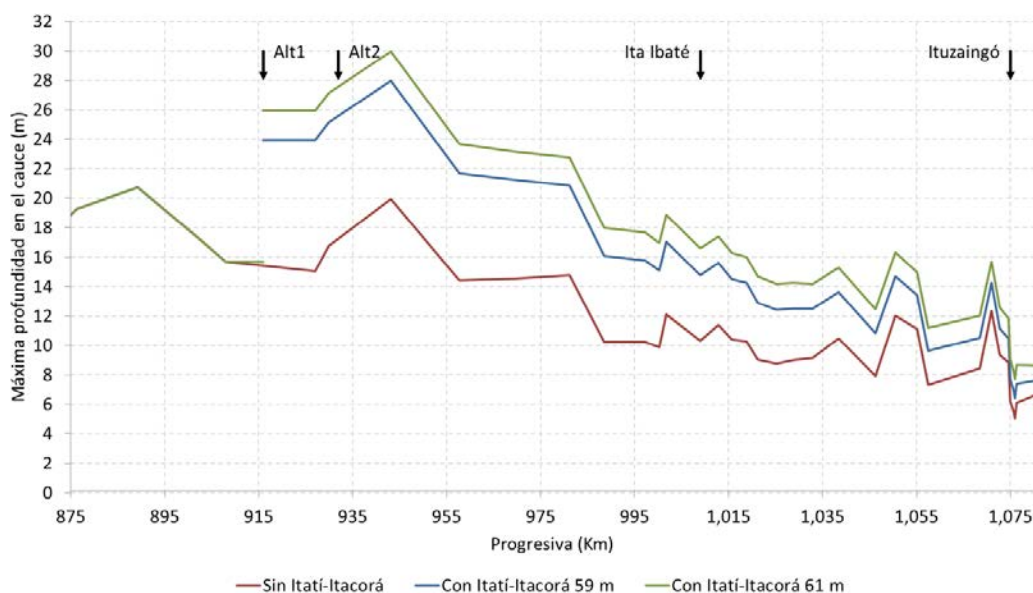


Figura 3.38. Perfil de tirantes para un caudal de 14.735 m³/s en distintos escenarios de proyecto.

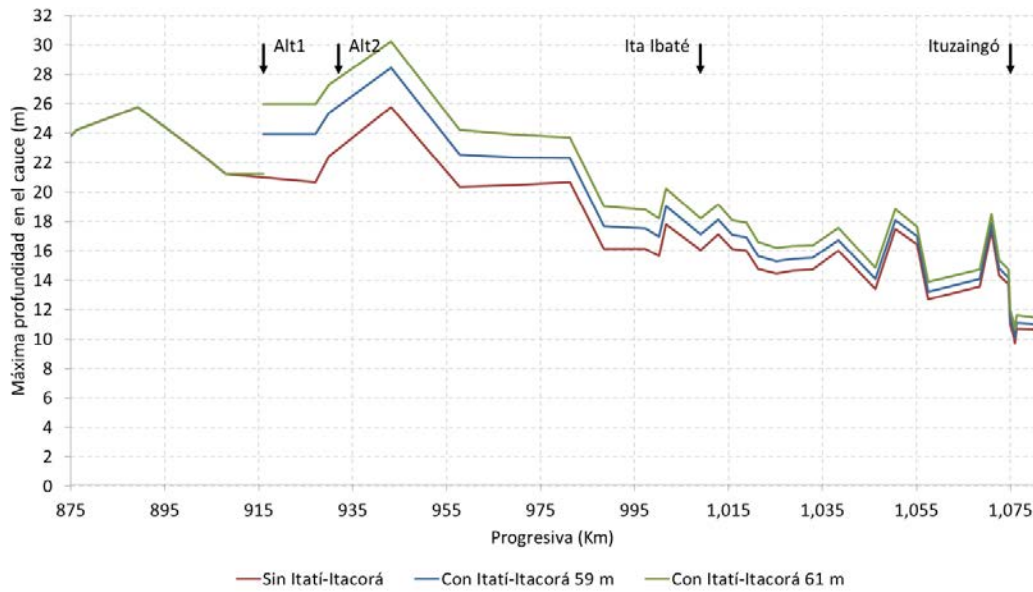


Figura 3.39. Perfil de tirantes para un caudal de 45.000 m³/s en distintos escenarios de proyecto.

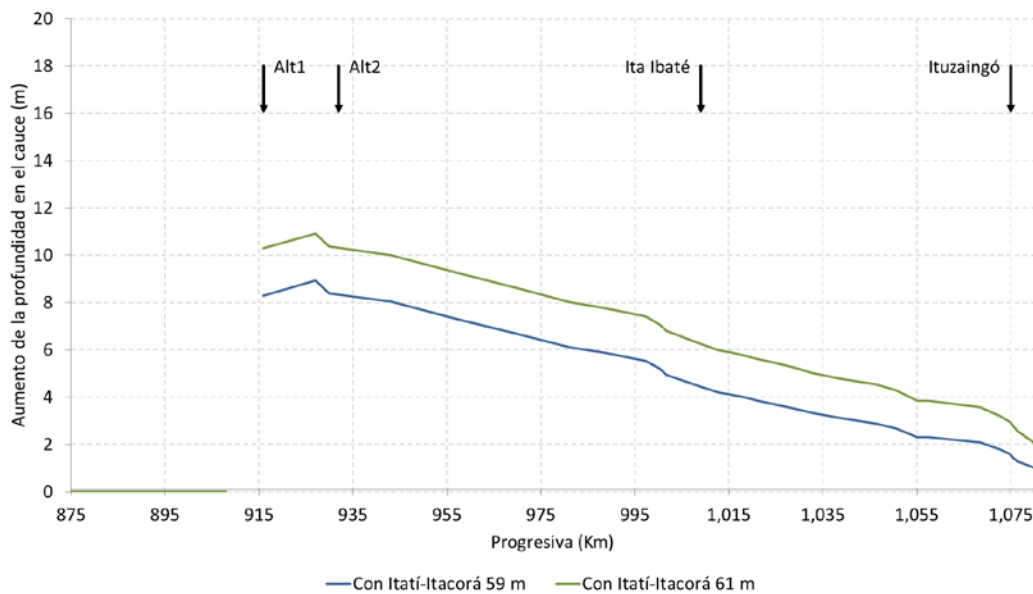


Figura 3.40. Aumento de profundidad respecto de la situación actual para un caudal de 14.735 m³/s en distintos escenarios de proyecto.

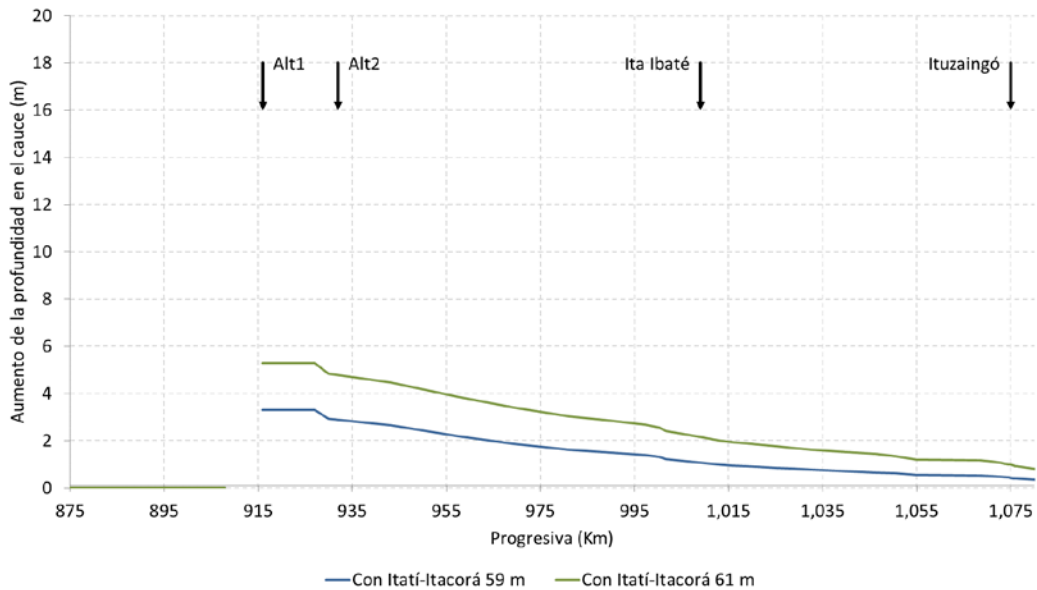


Figura 3.41. Aumento de profundidad respecto de la situación actual para un caudal de 45.000 m³/s en distintos escenarios de proyecto.

3.10.3 Ensayos con empuntamiento en las centrales

Se realizaron ensayos con las centrales Yacyretá e Itatí-Itacorá empuntadas.

Para caudales medio diarios similares o superiores al medio anual, el empuntamiento de las centrales es muy bajo o inexistente (dependiendo de la cantidad de turbinas en mantenimiento). Por lo tanto, a fin de obtener un escenario con un empuntamiento de elevada amplitud, se seleccionó un caudal medio diario de 10.500 m³/s.

Para Yacyretá se utilizó la política de operación propuesta por el Manual de Operaciones:

- Se considera un vertido de 1.000 m³/s por el brazo Aña Cuá.
- Para el caudal medio turbinado de 9.500 m³/s se adopta un valor valle de 6.200 m³/s, intermedio de 9.080 m³/s y pico de 13.400 m³/s.
- El gradiente ascendente previsto es de 3.000 m³/s.hr, y el descendente de 6.000 m³/s.hr.

Para Itatí-Itacorá se utilizó el criterio planteado para el modelo hidroenergético:

- Duración del caudal pico de 5 hr.
- Gradientes de ascenso y descenso de 6.000 m³/s.hr y 9.000 m³/s.hr, respectivamente.
- Caudal pico igual a la capacidad completa de turbinado, suponiendo 3 máquinas fuera de funcionamiento.
- Para el escenario de 30 unidades, 27 en funcionamiento con un caudal pico de 15.050 m³/s.
- Para el escenario de 34 unidades, 31 en funcionamiento con un caudal pico de 17.159 m³/s.

- Magnitud del caudal base de manera de obtener un caudal medio diario turbinado igual al del río.

En la **Figura 3.42** se observan los hidrogramas horarios de turbinado resultantes para ambas centrales, con el caudal medio diario de ensayo de $10.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

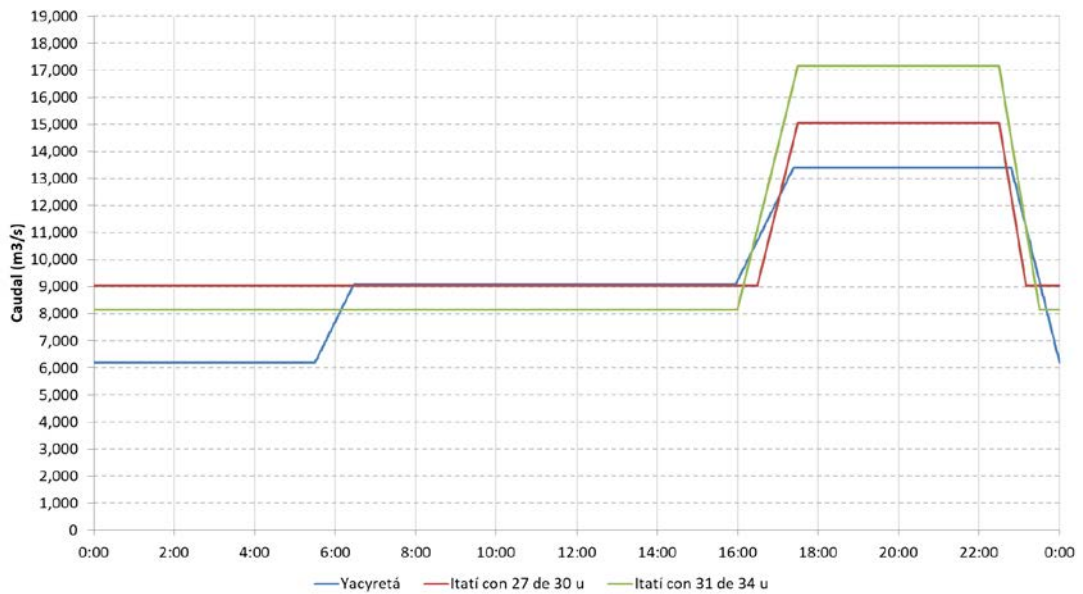
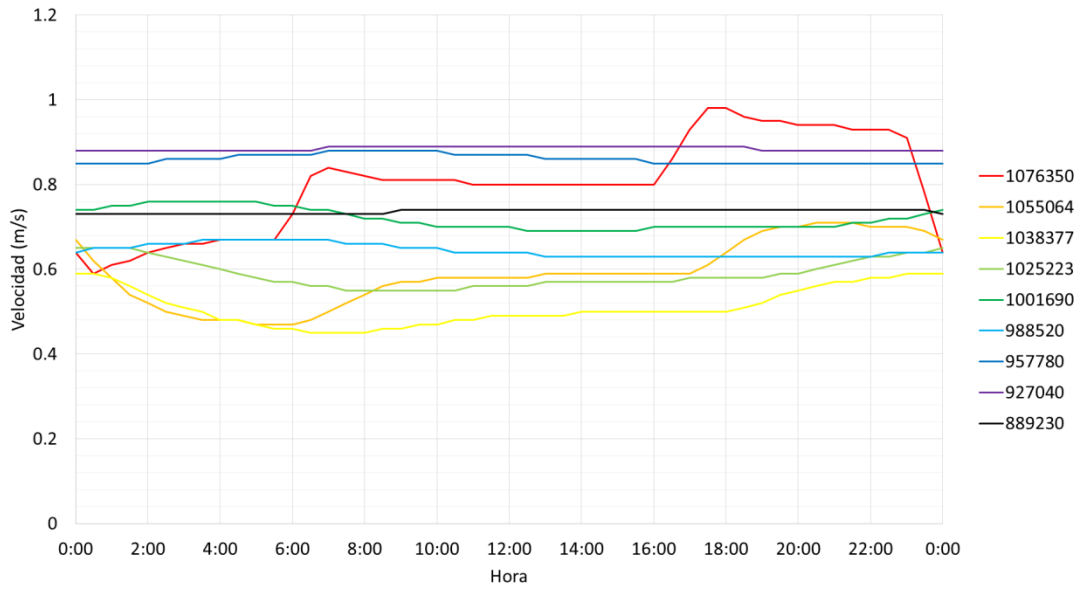


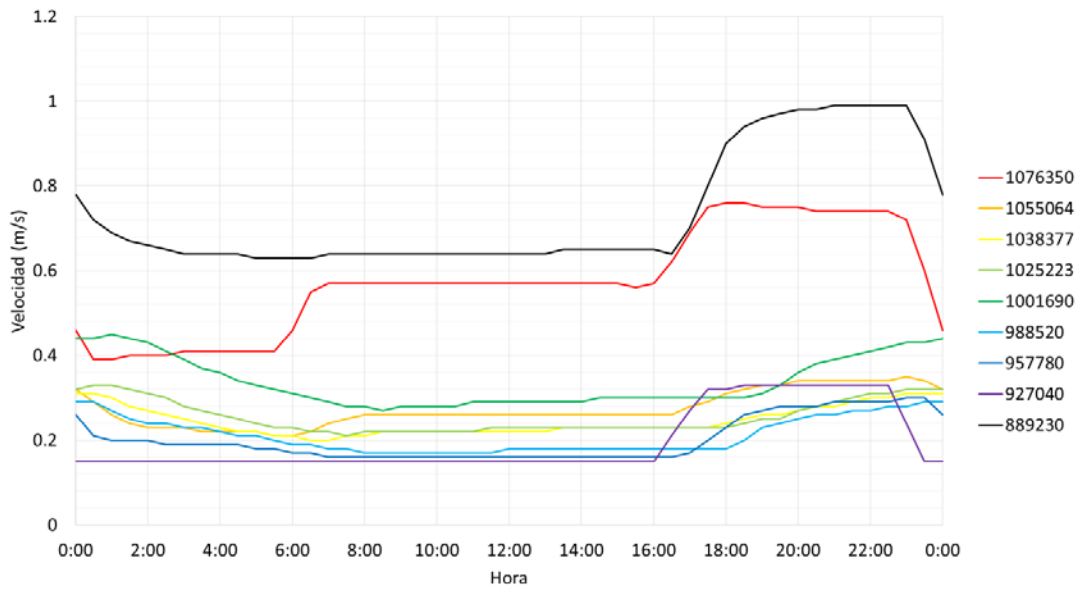
Figura 3.42. Hidrogramas de turbinado de Yacyretá e Itatí Itacorá para un caudal medio diario de $10.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Se simuló con el modelo un escenario con las dos centrales operando para condiciones actuales sin proyecto, y con el cierre en su alternativa 1A tanto a cota 59 m como 61 m. En el caso de la central Itatí-Itacorá, se consideró el esquema de empuntamiento con 31 (de 34) máquinas en funcionamiento, que es el que produce mayores variaciones horarias, y por lo tanto genera condiciones más severas.

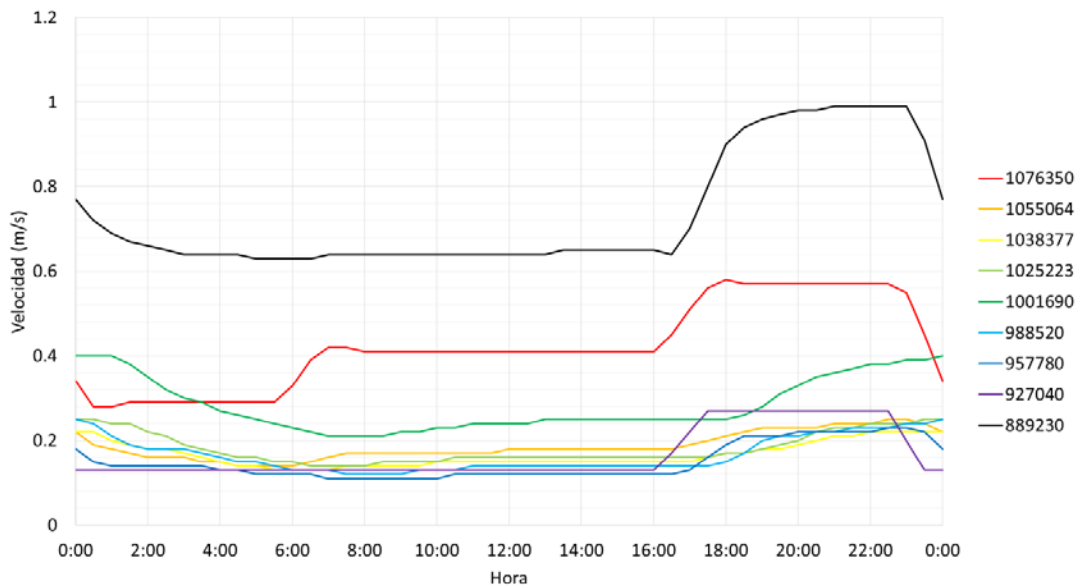
Para cada uno de estos escenarios se graficó la velocidad horaria obtenida en 8 secciones aproximadamente equiespaciadas entre Yacyretá e Itatí-Itacorá (entre progresivas 927 y 1076 km), así como una sección aguas abajo de este último cierre (progresiva 889 km). En la **Figura 3.43** se presentan las velocidades para los tres escenarios. Se observa que en las condiciones sin proyecto la oscilación de la velocidad producida por el empuntamiento de Yacyretá se atenúa relativamente rápido aguas abajo de esta, lo cual es un efecto de la fricción contra el cauce. Para el caso con proyecto esa oscilación sufre menor atenuación en el tramo entre las presas, debido a la disminución de los efectos resistivos por el incremento de tirante y la reducción de velocidad. Además, el propio empuntamiento de Itatí-Itacorá impone alguna oscilación aguas arriba.



a) Sin embalse Itatí-Itacorá, con Yacyretá empuntada



b) Con embalse Itatí-Itacorá a cota 59 m, con ambas centrales empuntadas



c) Con embalse Itatí-Itacorá a cota 61 m, con ambas centrales empuntadas

Figura 3.43. Modulación horaria de las velocidades en distintas secciones producidas por el empuntado de las centrales, para un caudal medio diario de 10.500 m³/s.

Este efecto se aprecia mejor en la **Figura 3.44**, donde se presentan las envolventes de las velocidades diarias (máxima y mínima) para las mismas tres condiciones. Se observa que en el tramo entre presas la amplitud de la oscilación es mayor sin proyecto hasta algo más de 25 km aguas abajo de Yacyretá. En este subtramo la amplitud es entre aproximadamente 5% y 35% menor para el embalse a cota 59 mIGN, y entre 20% y 50% menor para el embalse a cota 61 mIGN. Luego la relación es inversa, ya que la amplitud se torna mayor en las situaciones de proyecto, pasando de incrementos de entre aproximadamente 10% y 20% a 50 km aguas abajo de Yacyretá hasta factores de amplificación de entre 20 y 25 a 150 km aguas abajo de Yacyretá.

En la **Figura 3.45** se presentan las envolventes de los caudales instantáneos (mínimo y máximo) para un caudal medio de 10.500 m³/s que ocurren por efecto del empuntamiento. Nuevamente se observa que sin la presencia de Itatí-Itacorá las variaciones impuestas por el empuntamiento de Yacyretá se atenúan, y que a la sección del nuevo aprovechamiento llega prácticamente un caudal constante. Con la construcción de Itatí-Itacorá y su empuntamiento las variaciones intradiarias de caudal se mantendrán en todo el tramo, y especialmente, aguas abajo de este.

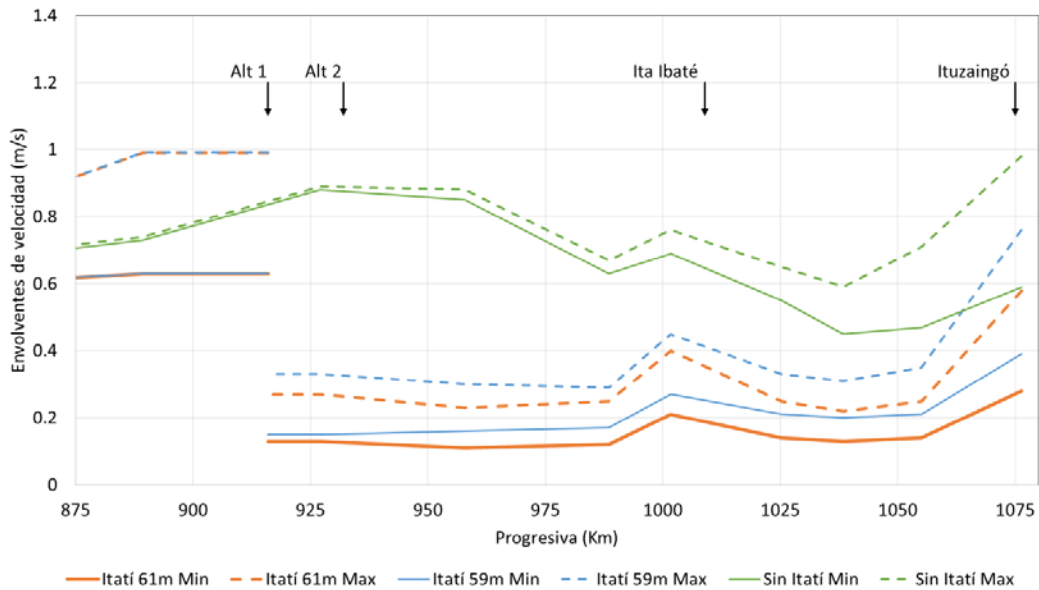


Figura 3.44. Envolturas de la velocidad en distintas secciones producidas por el empuntado de Yacyretá e Itatí-Itacorá para un caudal medio diario de $10.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

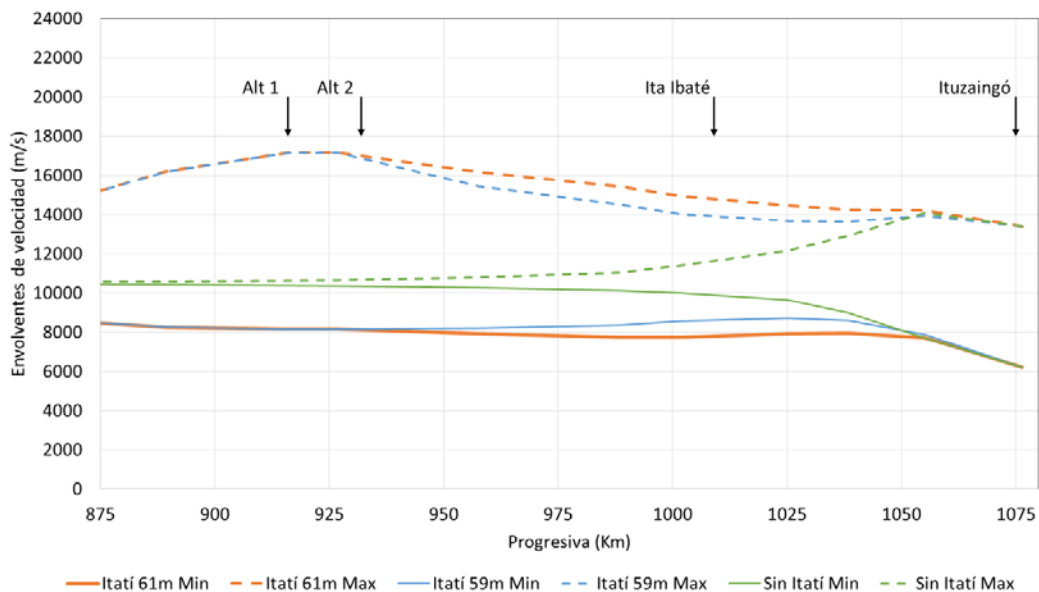


Figura 3.45. Envolturas del caudal en distintas secciones producidas por el empuntado de Yacyretá e Itatí-Itacorá para un caudal medio diario de $10.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Las figuras anteriores también permiten evaluar cómo el empuntamiento de Itatí-Itacorá afecta las condiciones de navegabilidad aguas abajo del cierre.

Por un lado, se observa que en ese tramo se incrementan los caudales y velocidades máximos, dado que durante una parte del día se turbinan un caudal superior al medio diario. No obstante, para las condiciones ensayadas la velocidad máxima obtenida aguas abajo de Itatí-Itacorá por efecto del empuntamiento es de solo $1,0 \text{ m/s}$ que, como se mencionó anteriormente, no representa un obstáculo para la navegación de las embarcaciones que

circulan por el tramo. Al mismo tiempo, el empuntamiento de Itatí-Itacorá genera una disminución de las velocidades medias aguas abajo del cierre durante algunas horas del día, a un valor del orden de 0,6 m/s.

Esto significa que, en el hipotético caso de que una embarcación se encontrara restringida actualmente para la navegación entre Confluencia e Itatí-Itacorá por altas velocidades, con el proyecto Itatí-Itacorá se podría aprovechar las horas del día con caudal relativamente bajo para realizar la navegación. Si, por el contrario, el calado en ese tramo resultara restrictivo, la embarcación podría realizar la navegación durante las horas del día en que se turbinan el caudal pico, el cual produce en el tramo un caudal superior a 14.000 m³/s.

En definitiva, el empuntamiento de Itatí-Itacorá para condiciones de caudal bajo resulta en una mejora las condiciones de navegabilidad también en el tramo entre Confluencia y el aprovechamiento.

3.11 Modelo hidrodinámico 1D con actualización de MDE

En el marco del presente proyecto, el IGN realizó un relevamiento aerofotogramétrico de la zona de estudio, que abarcó desde la presa de Yacyretá hasta la ciudad de Itatí (**Figura 3.46**), en base al cual se generó un MDE del Terreno (IGN, 2018).



Figura 3.46. Sector de trabajo encomendado por la COMIP al IGN para su relevamiento aerofotogramétrico.

Esta información fue incorporada al modelo hidrodinámico, extendiendo las secciones relevadas para el proyecto (ITAIPU, 2017) con cortes efectuados sobre el MDE para representar a las planicies de inundación. Se trata de un total de 19 secciones, desde la confluencia del río Paraná con el río Paraguay hasta la confluencia del Brazo Principal con el Brazo Aña Cuá (aguas abajo de Yacyretá), tal como se muestra en la **Figura 3.47**. Las secciones utilizadas en el modelo hidrodinámico original fueron descartadas.

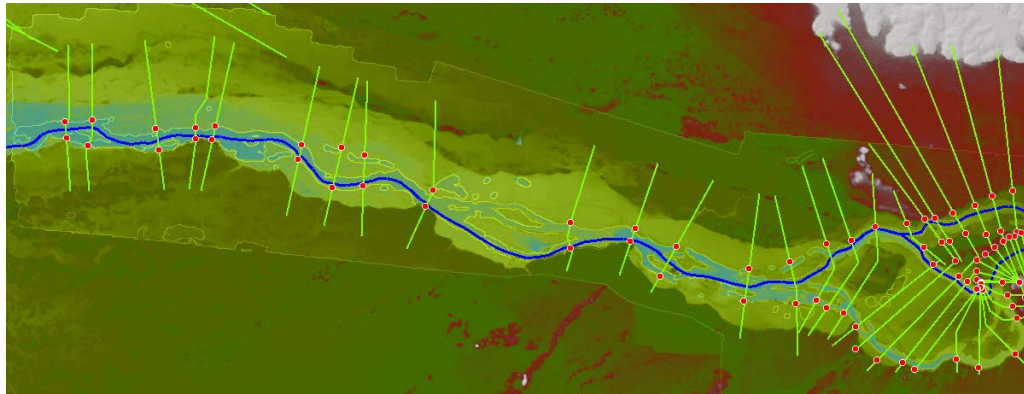
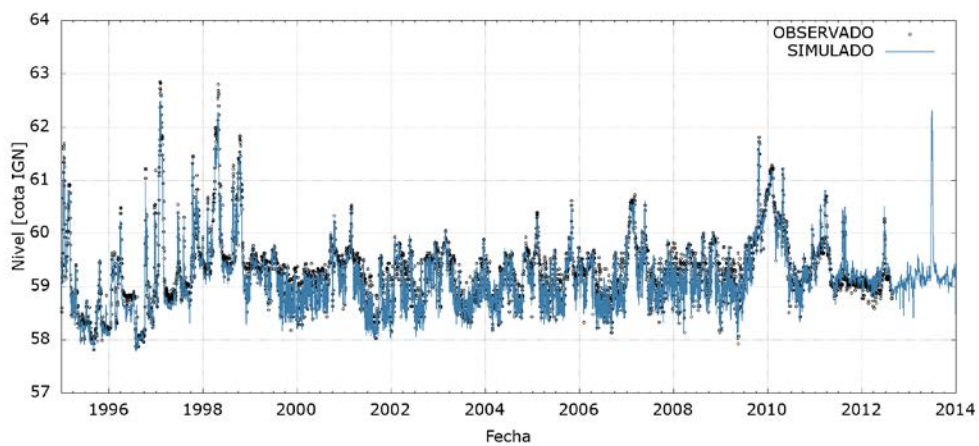
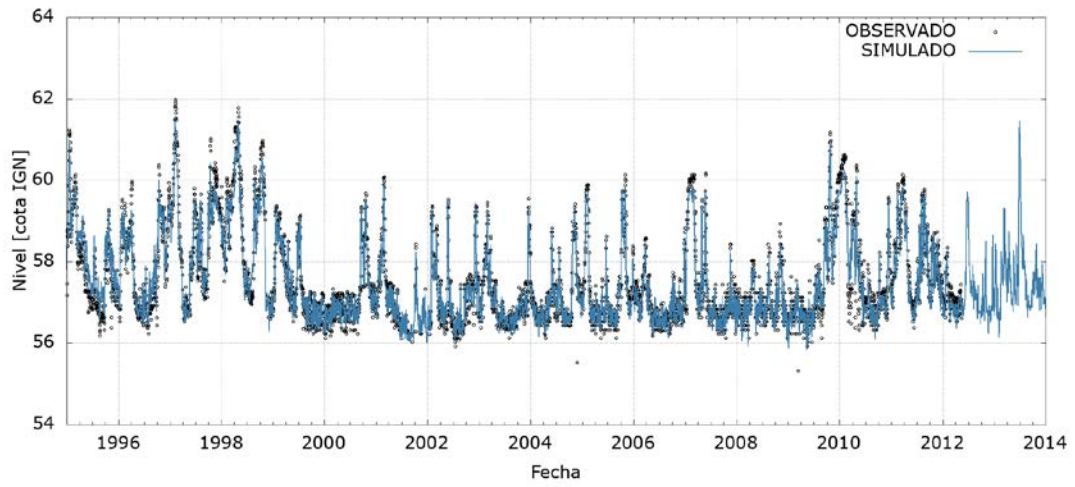


Figura 3.47. Secciones actualizadas con el nuevo MDE.

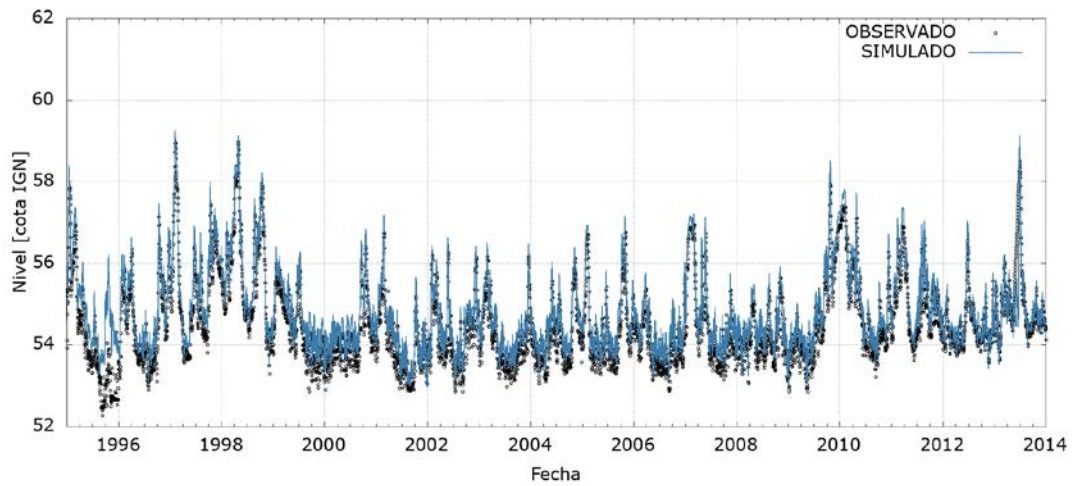
El modelo actualizado fue recalibrado sobre la ventana de tiempo que se extiende entre el 1 de enero de 1995 y el 30 de setiembre de 2014 (algo menos de 20 años). Se utilizó la rugosidad de Manning como variable de ajuste. Se adoptaron valores en el cauce de 0.030 desde la confluencia de los brazos Aña Cuá y San Jose-Mi hasta la confluencia con el Brazo Principal; 0.026 hasta la ciudad de Ita Ibaté; y 0.027 hasta la confluencia con el río Paraguay. Para la planicie de inundación se utilizó un valor de 0.2 constante en todo el dominio. La **Figura 3.48** presenta la comparación entre observaciones y resultados del modelo para ese período, observándose un acuerdo muy satisfactorio.



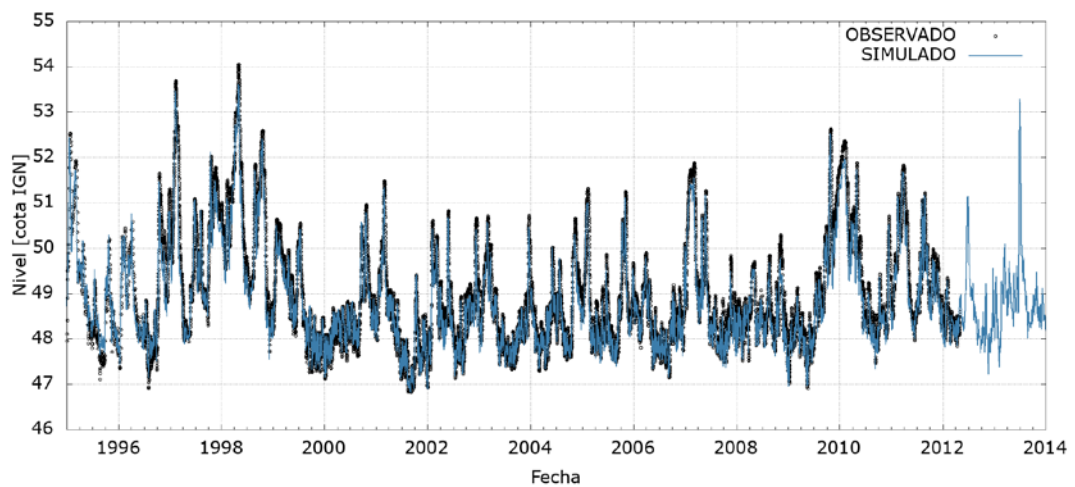
a) Ituzaingó



b) Ayolas



c) Ita Ibaté



d) Itatí

Figura 3.48. Comparación entre niveles simulados y observados con el modelo MOAGAB actualizado para la ventana de tiempo de calibración en diferentes estaciones hidrométricas.

La **Tabla 3.3** muestra los indicadores de bondad de ajuste, a saber, Diferencia de Valores Medios (*MED*), Raíz del Error Cuadrático Medio (*RMSE*), Coeficiente de Determinación (R^2) e Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (*NSE*).

Tabla 3.3. Indicadores de bondad de ajuste para la calibración del modelo MOAGAB.

Estación	<i>MED</i> (m)	<i>RMSE</i> (m)	R^2	<i>NSE</i>
Ituzaingó	-0.08	0.18	0.97	0.92
Ayolas	-0.04	0.23	0.98	0.96
Italbaté	0.15	0.22	0.99	0.95
Itatí	-0.13	0.23	0.99	0.96

La utilización del modelo hidrodinámico actualizado condujo a resultados de perfiles de agua indistinguibles de los obtenidos con el modelo antecedente, lo cual era esperable dado que la recalibración generó un grado de acuerdo entre niveles calculados y medidos totalmente similar. En cambio, sí se aplicó el modelo actualizado para la determinación de las áreas inundadas, afectadas directamente por la variación en la representación topográfica. También se utilizó el nuevo modelo para calcular las curvas clave de modo de disponer de ecuaciones totalmente actualizadas, si bien sólo se ven levemente afectadas por el cambio de MDE.

3.12 Áreas inundadas

Se utilizó el modelo 1D para obtener mapas de áreas de inundación a partir de simulaciones realizadas para dos valores de caudal, considerados constantes:

- $14.735 \text{ m}^3/\text{s}$. Este surge de calcular el caudal medio afluente a Yacyretá (escala de Posadas) para la ventana de tiempo que se extiende desde la entrada en funcionamiento de la primera unidad (setiembre de 1994) hasta octubre de 2017³. Se lo consideró como representativo de condiciones hidrológicas medias.
- $45.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Este fue el valor estimado asociado al nivel máximo registrado en la historia de la escala hidrométrica de Posadas en el año 1905. Si bien, efectivamente, esa había sido la estimación inicial histórica, al disponerse de más información luego de las crecidas extraordinarias posteriores (especialmente las de 1982 y 1983) se efectuó una corrección, estimándose desde entonces que aquél estuvo por encima de los $50.000 \text{ m}^3/\text{s}$. El valor de $45.000 \text{ m}^3/\text{s}$ se ha considerado entonces, a los fines de este estudio, como representativo del orden del pico de crecidas extraordinarias de modo de ser utilizado para los estudios de impacto ambiental.

En el borde de aguas arriba del modelo estos caudales se erogan parcialmente por el Brazo Principal y por el Brazo Aña Cuá de Yacyretá. La partición entre ambos brazos se estableció e acuerdo a las reglas de operación de esta presa, que resulta en los caudales presentados en la **Tabla 3.4**.

³ www.eby.org.ar/images/nm/pdfgeneracion/YacyretaCaudalesDesdeInicioOperacion.pdf

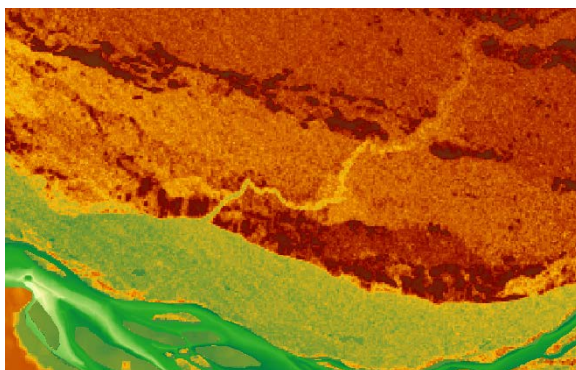
Tabla 3.4. Partición de caudales para los escenarios de aras inundadas a caudal constante.

Caudal total (m ³ /s)	Caudal Yacyretá Brazo Principal (m ³ /s)	Caudal Yacyretá Brazo Aña Cuá (m ³ /s)
14.735	10.315	4.420
45.000	30.633	14.367

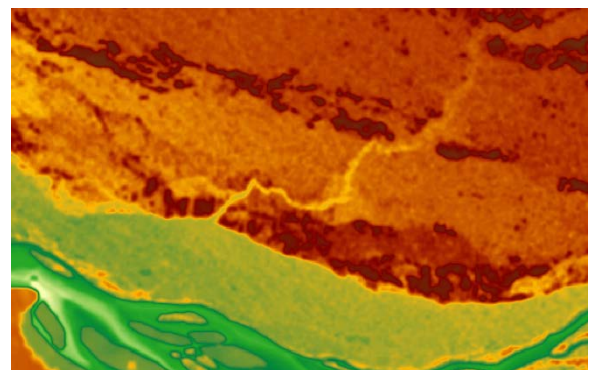
Se realizaron simulaciones para ambos valores de caudal, manteniéndolo constante hasta alcanzar condiciones de equilibrio, tanto para el río en condiciones naturales como para cada uno de las alternativas de cierre de Itatí-Itacorá, suponiendo condiciones de operación para niveles de retenida de 59 m y 61 m.

Para la construcción de mapas de inundación se utilizó el algoritmo incorporado en el código HEC-RAS. Dicho algoritmo construye regiones cuadrangulares entre cada par de secciones transversales, dentro de las cuales interpola el nivel de la superficie libre de manera lineal. Luego este campo de niveles interpolados es intersectado con un Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno en forma de grilla regular (*raster*) para determinar qué píxeles resultan inundados.

Para la generación de mapas se utilizó como base el MDE del terreno generado durante los estudios para el PAE de Yacyretá. En la zona de márgenes los datos provienen esencialmente del modelo de radar SRTM. Este está afectado de contaminación de alta frecuencia ó ‘ruido’ (píxeles altos y bajos adyacentes), por lo que su uso directo da como resultado manchas de inundación con bordes ruidosos (píxeles inundados y no inundados adyacentes). Para suavizar este efecto, al MDE se le aplicó tres pasadas de un filtro pasabajos 3x3 utilizando la herramienta *Filter* de ArcGIS. La comparación del MDE original y el filtrado se presenta en la **Figura 3.49**.



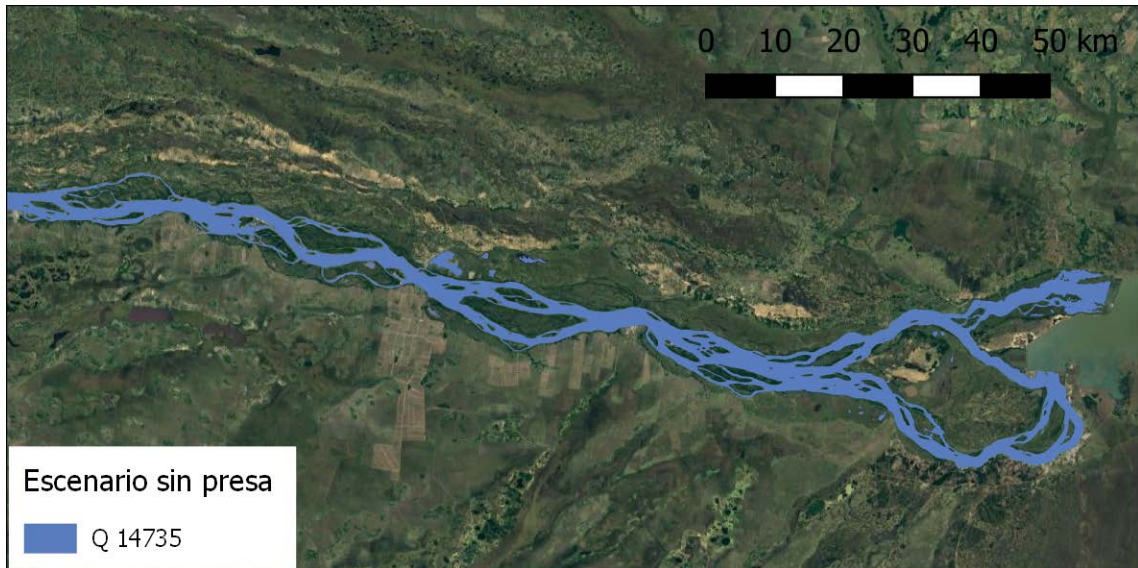
a) MDE Yacyretá



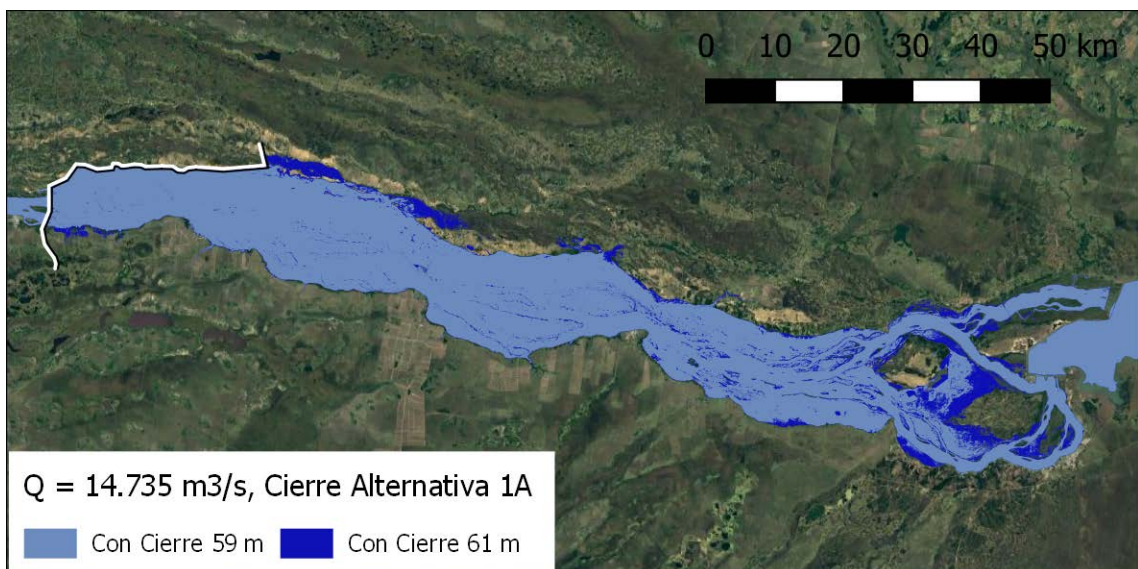
b) MDE filtrado

Figura 3.49. Modelo digital de elevación para mapas de inundación.

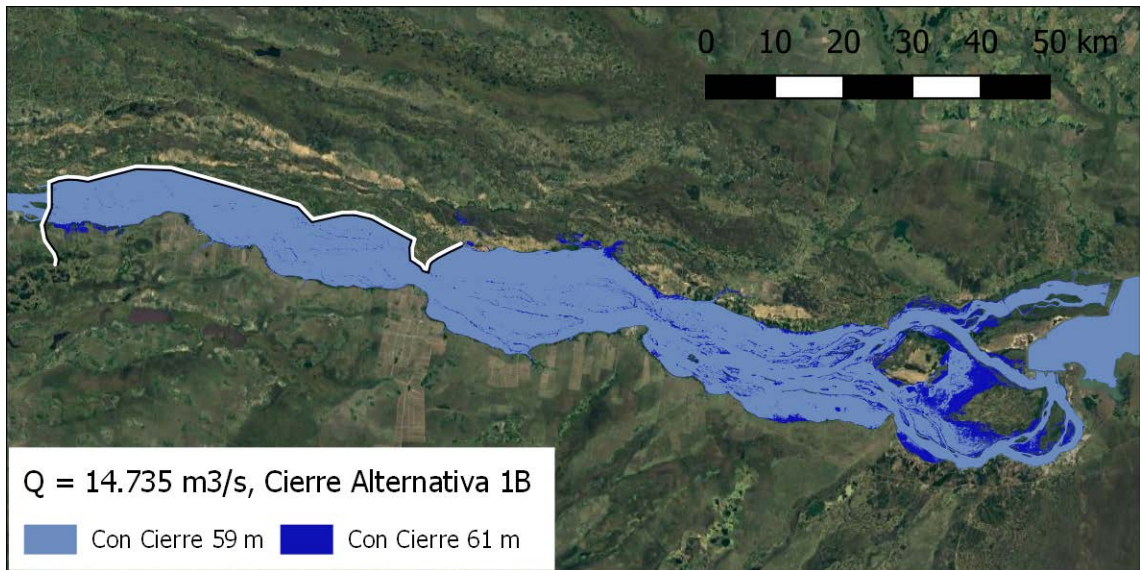
En la **Figura 3.50** se presentan los mapas de inundación para el caudal de $14.735 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en la **Figura 3.51** se muestran los correspondientes a $45.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa, como era de esperarse, que el aumento de áreas inundadas por efecto del cierre es sustancial en el caso del caudal medio, pero relativamente pequeño en condiciones de crecida. También se observa que las alternativas con cierres laterales reducen apreciablemente las áreas inundadas en margen derecha, e incluso que en condiciones de crecida evitarían la inundación de algunas zonas respecto de lo que sucede en condiciones naturales.



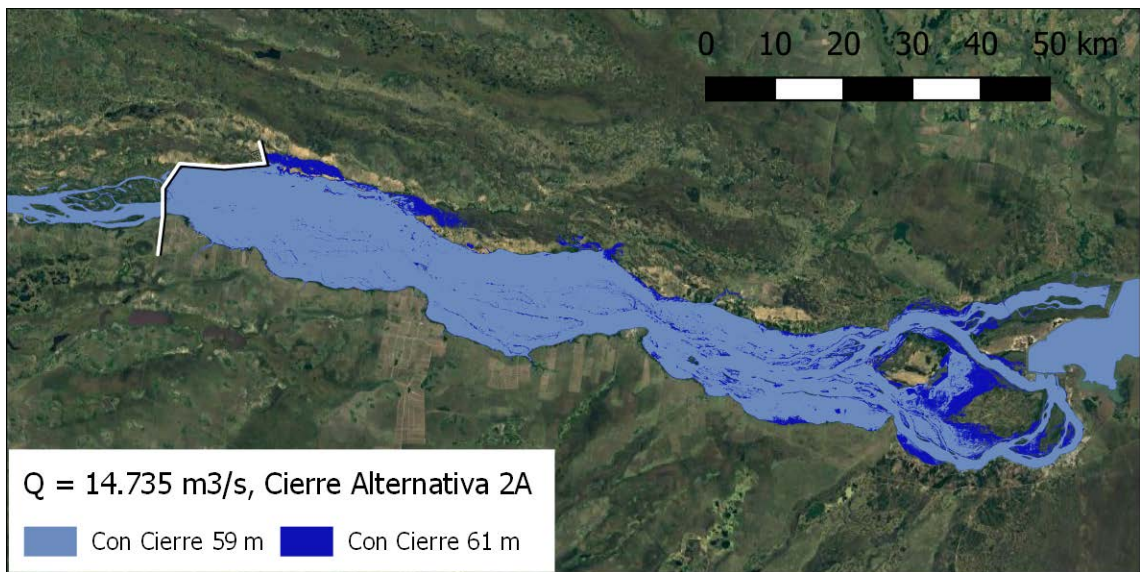
a) Sin obra



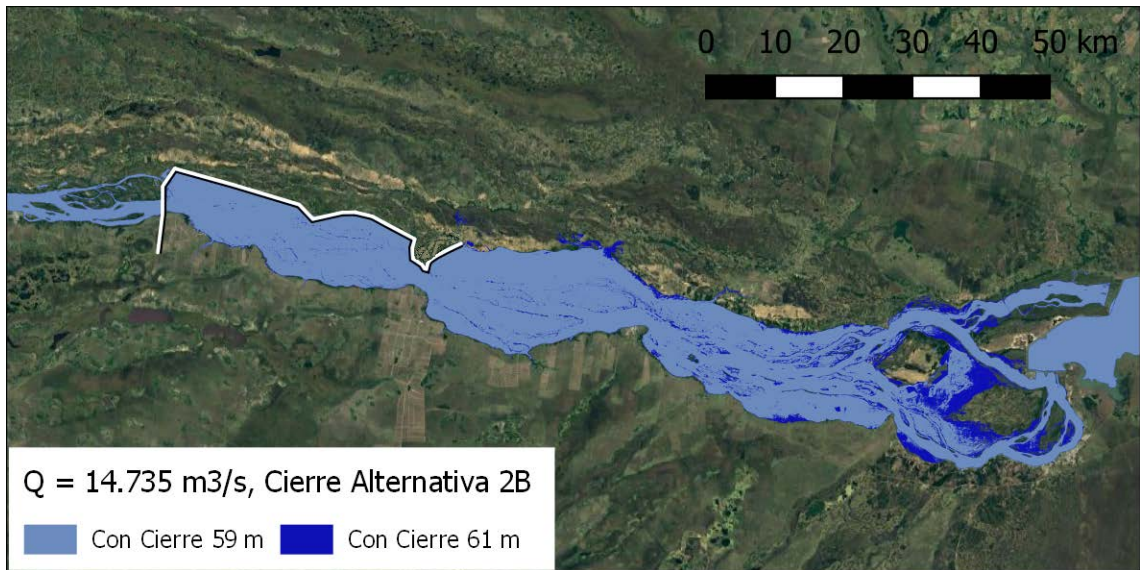
b) Alternativa 1A



c) Alternativa 1B

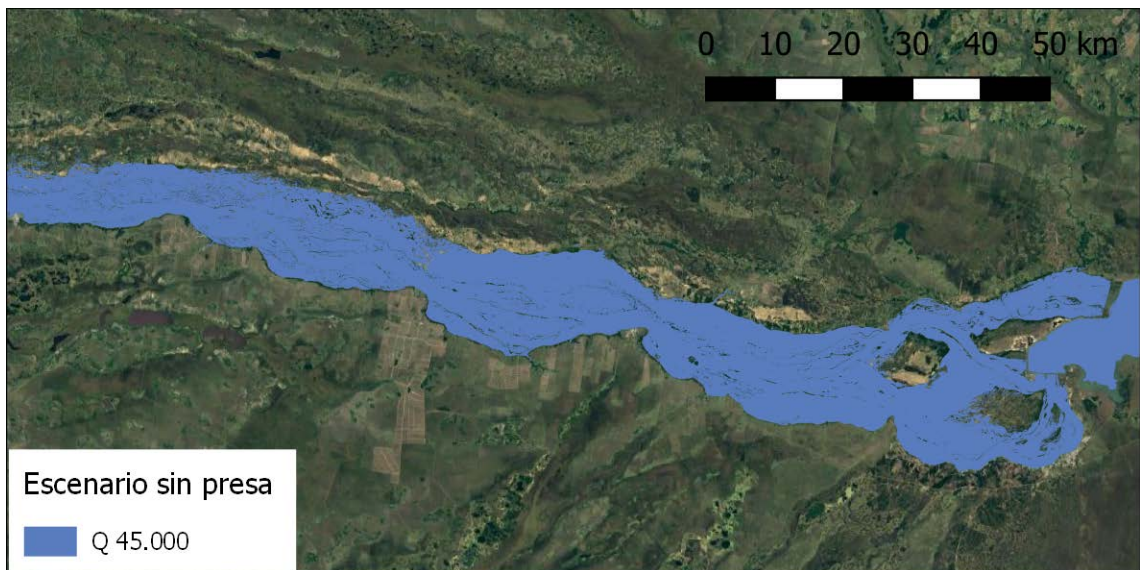


d) Alternativa 2A

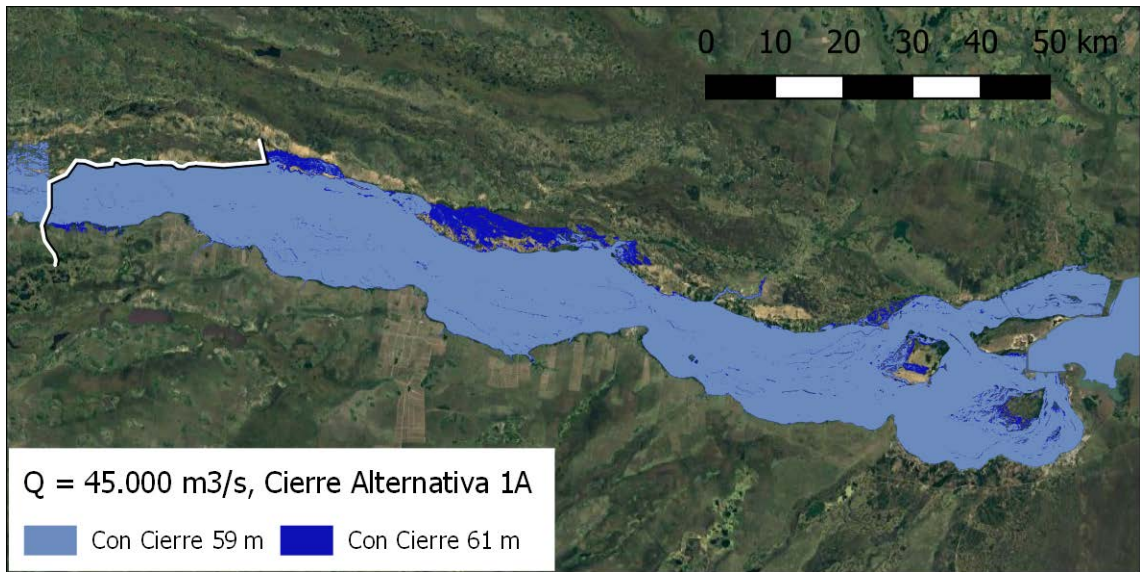


e) Alternativa 2B

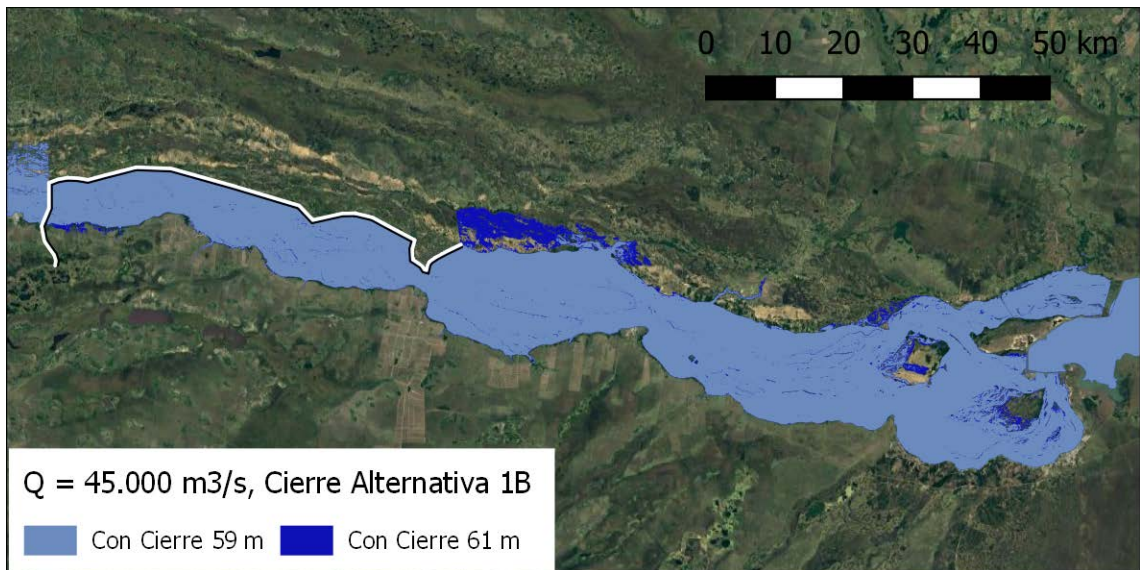
Figura 3.50. Áreas inundadas, caudal de 14.735 m³/s



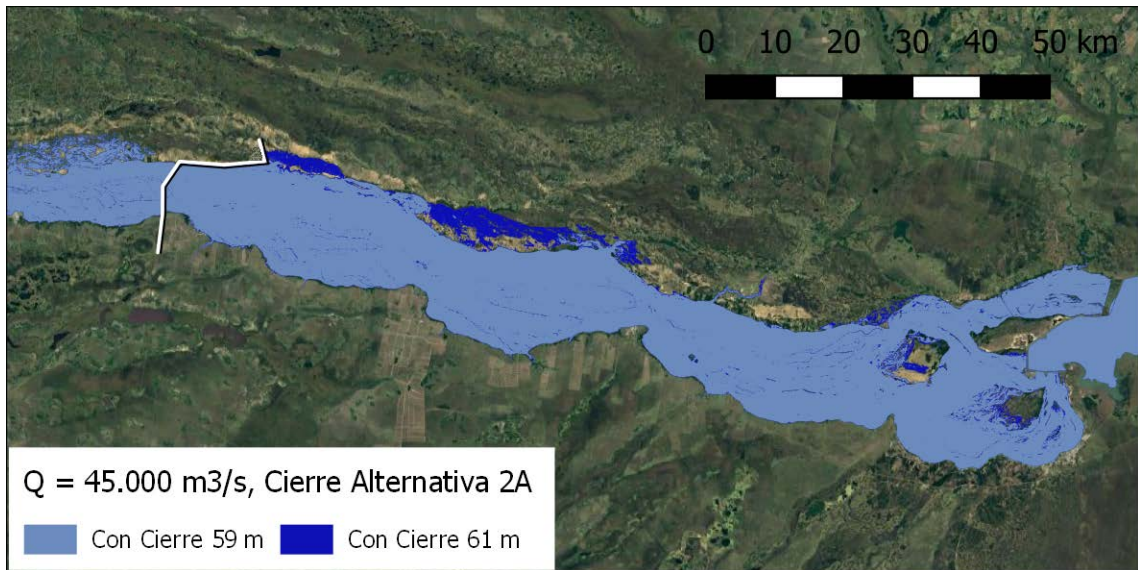
a) Sin obra



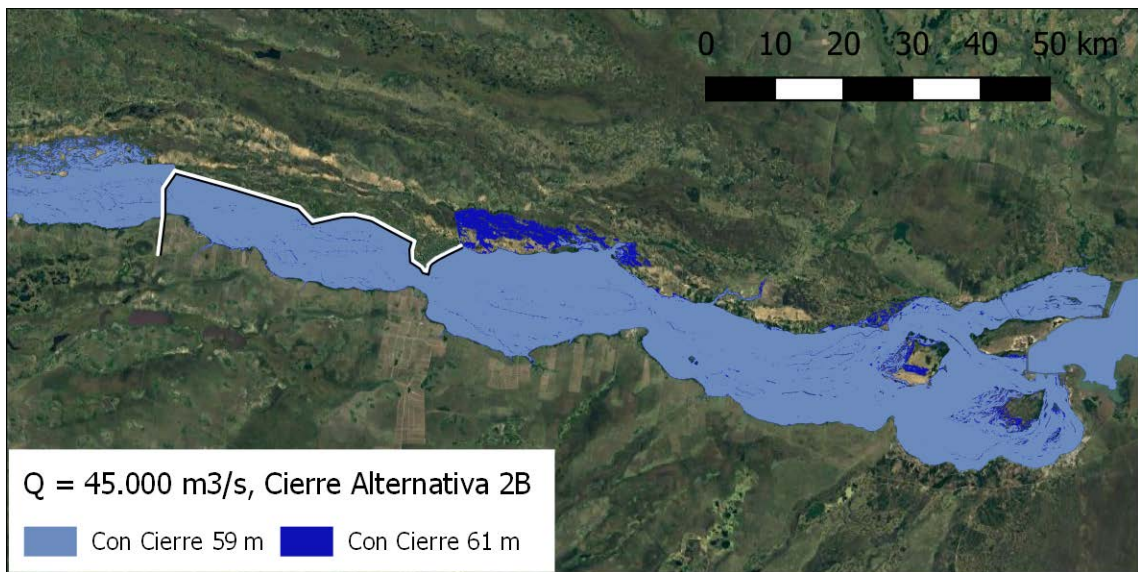
b) Alternativa 1A



c) Alternativa 1B



d) Alternativa 2A



e) Alternativa 2B

Figura 3.51. Áreas inundadas, caudal de 45.000 m³/s

Se cuantificaron las áreas inundadas para cada escenario, discriminándolas por zona según la **Figura 3.52**. En la **Tabla 3.5** y la **Tabla 3.6** se presenta el detalle de área inundada para cada zona en el caso de embalse a cota 61 m, mientras que en la **Tabla 3.7** y la **Tabla 3.8** se presentan los resultados para el caso de embalse a cota 59 m. Nótese que la presencia de la obra reduce levemente el área inundada sobre margen derecha para el mayor caudal.

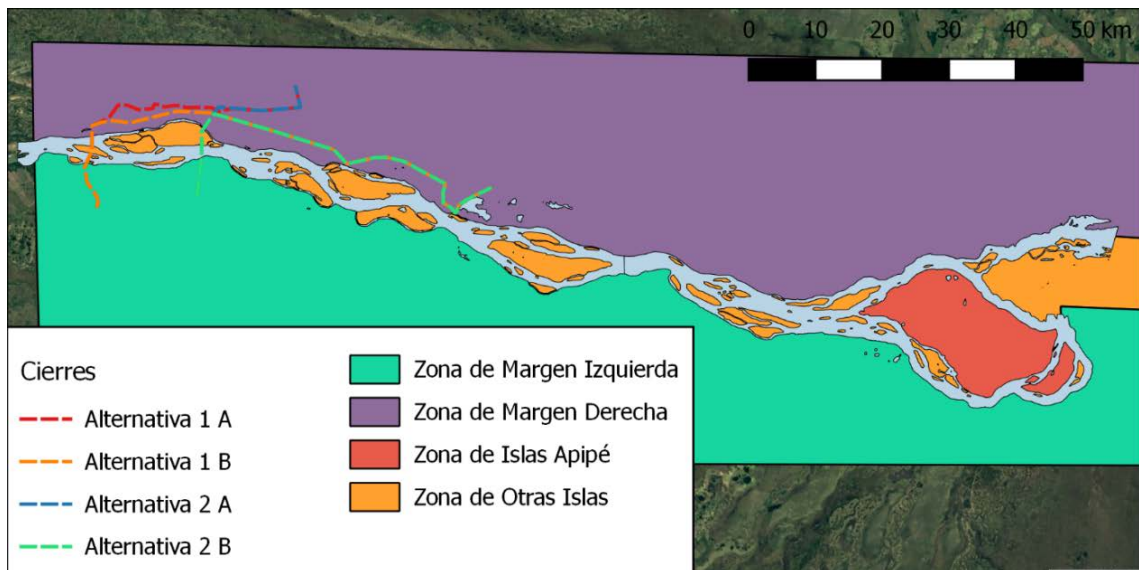


Figura 3.52. Zonas en las cuales se discrimina el área inundada.

Tabla 3.5. Areas inundadas por zona, embalse nivel 61 m, caudal 14.735 m³/s

alternativa	Caudal en Yacyreta = 14.735 m ³ /s						
	Área del embalse	Área inundada en condiciones naturales	Área inundada por el Embalse vs rio natural				
			en MD	en MI	zona de Islas	Isla Apipe	Total
	has	has	has	has	has	has	has
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(A-B)
1a	188,537	63,197	66,420	17,160	27,022	14,739	125,340
1b	166,039	63,197	43,903	17,159	27,029	14,751	102,842
2a	173,403	58,588	61,590	16,397	22,166	14,662	114,815
2b	153,227	58,588	41,396	16,399	22,173	14,672	94,639

Tabla 3.6. Areas inundadas por zona, embalse nivel 61 m, caudal 45.000 m³/s

alternativa	Caudal en Yacyreta = 45.000 m ³ /s							
	Área del embalse	Área inundada en condiciones naturales	Área inundada por el Embalse vs rio natural					Área protegida por la presa lateral*
			en MD	en MI	zona de Islas	Isla Apipe	Total	
	has	has	has	has	has	has	has	has
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(A-B)	
1a	214,416	180,955	22,716	2,217	2,763	5,765	33,461	-
1b	191,685	180,955	-86	2,222	2,776	5,818	10,731	22,731
2a	198,443	167,607	21,436	1,470	2,386	5,543	30,835	-
2b	177,907	167,607	839	1,480	2,393	5,588	10,300	20,535

Tabla 3.7. Areas inundadas por zona, embalse nivel 59 m, caudal 14.735 m³/s

alternativa	Caudal en Yacyreta = 14.735 m ³ /s						
	Área del embalse	Área inundada en condiciones naturales	Área inundada por el Embalse vs rio natural				
			en MD	en MI	zona de Islas	Isla Apipe	Total
	has	has	has	has	has	has	has
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(A-B)
1a	165,200	63,197	58,357	14,346	23,142	6,157	102,003
1b	147,007	63,197	40,158	14,346	23,143	6,163	83,810
2a	150,445	58,588	53,495	14,141	18,299	5,921	91,857
2b	134,593	58,588	37,634	14,143	18,301	5,927	76,005

Tabla 3.8. Areas inundadas por zona, embalse nivel 59 m, caudal 45.000 m³/s

alternativa	Caudal en Yacyreta = 45.000 m ³ /s							Área protegida por la presa lateral*
	Área del embalse	Área inundada en condiciones naturales	Área inundada por el Embalse vs rio natural					
			en MD	en MI	zona de Islas	Isla Apipe	Total	
has	has	has	has	has	has	has	has	
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(A-B)		
1a	199,651	180,955	11,719	1,197	2,195	3,586	18,696	-
1b	179,767	180,955	-8,204	1,200	2,201	3,616	-1,187	19,884
2a	184,156	167,607	10,541	937	1,782	3,289	16,549	-
2b	167,037	167,607	-6,611	941	1,788	3,312	-570	17,119

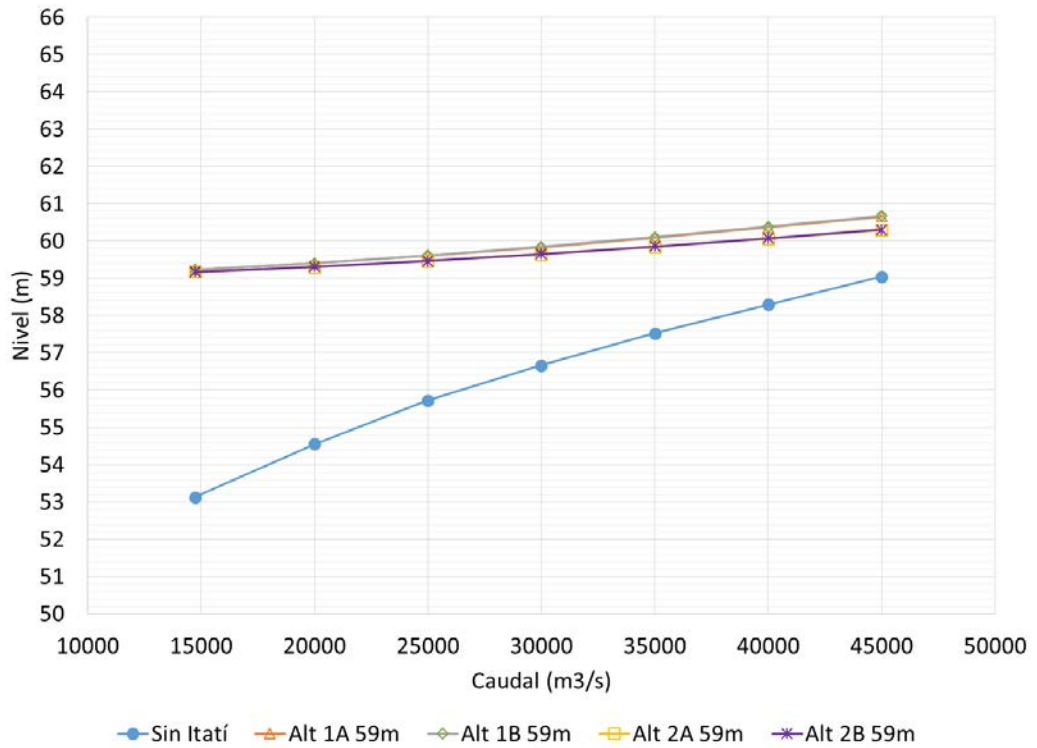
Como complemento de los mapas de inundación se calcularon, mediante el modelo, curvas caudal-nivel para estudiar la afectación del embalse Itatí-Itacorá sobre distintas localidades ubicadas aguas abajo de Yacyretá.

En algunas de las localidades, presentadas en la **Tabla 3.9**, se cuenta con niveles de alerta y evacuación, que fueron superpuestos a las curvas caudal-nivel. Los niveles de alerta y evacuación para las localidades de la margen izquierda fueron obtenidos de los informes del PAE de Yacyretá (INA, 2015a). Los ceros de escala de todas las estaciones, así como los niveles de alerta y evacuación de la ciudad de Ayolas fueron suministrados por la EBY.

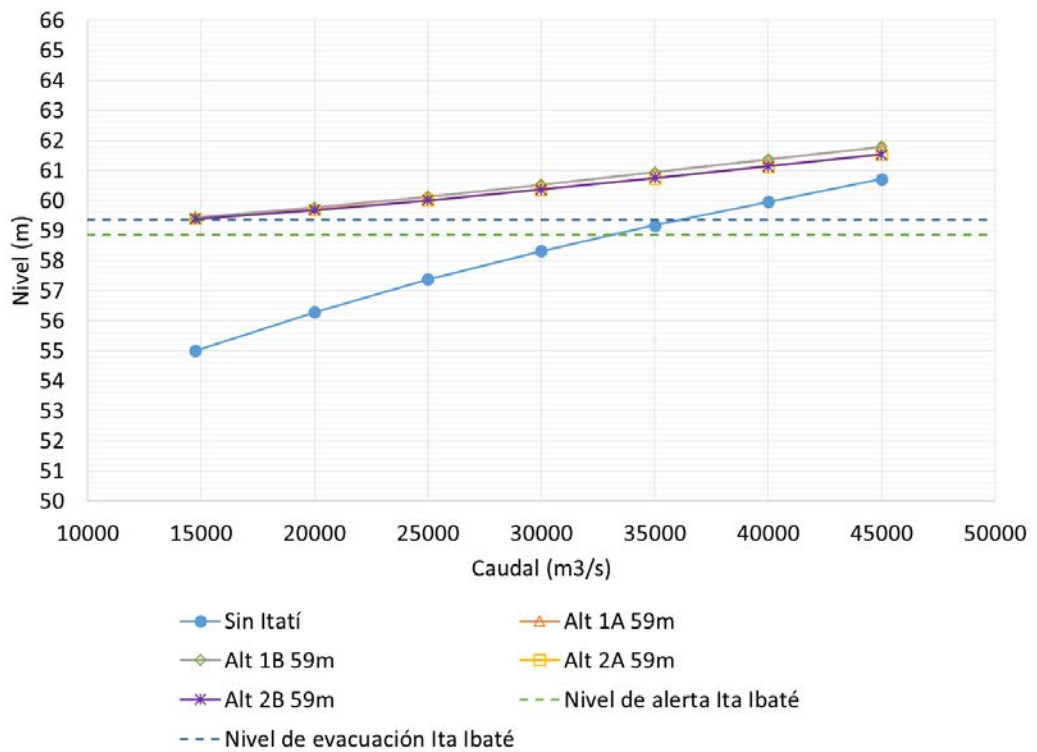
Tabla 3.9. Niveles hidrométricos de alerta y evacuación.

Localidad	Cero de escala	Nivel de alerta	Nivel de evacuación
	[m IGN]	[m]	[m]
Ayolas	55,33	3,80	4,50
Ituzaingó	57,41	3,50	4,00
Ita Ibaté	51,90	7,00	7,50

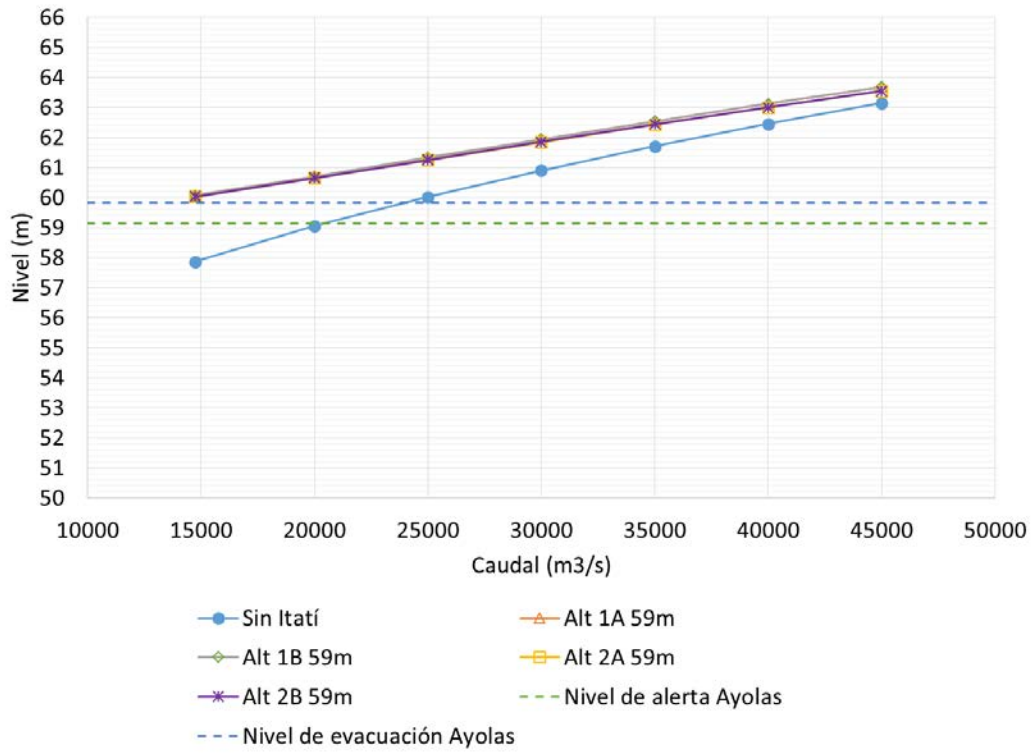
En la **Figura 3.53** se presentan los niveles en cada localidad para un nivel de embalse de 59 m en Itatí-Itacorá, mientras que en la **Figura 3.54** se muestra lo propio para un nivel de embalse de 61 m.



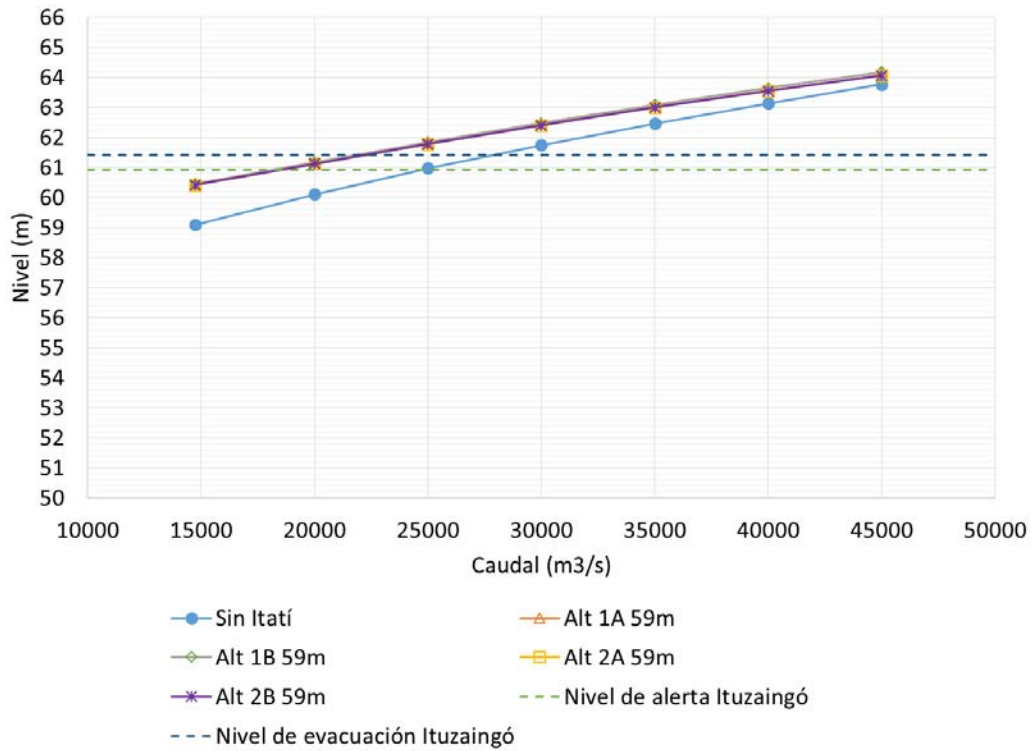
a) Yahapé y Cerrito



b) Ita Ibaté

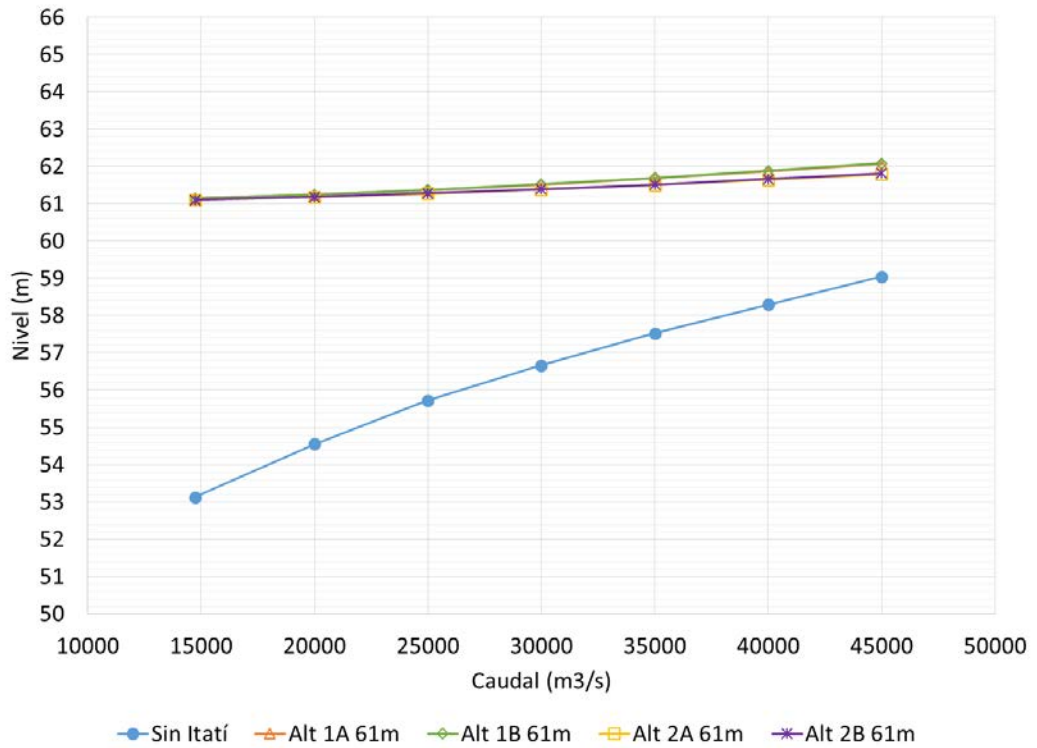


c) Ayolas

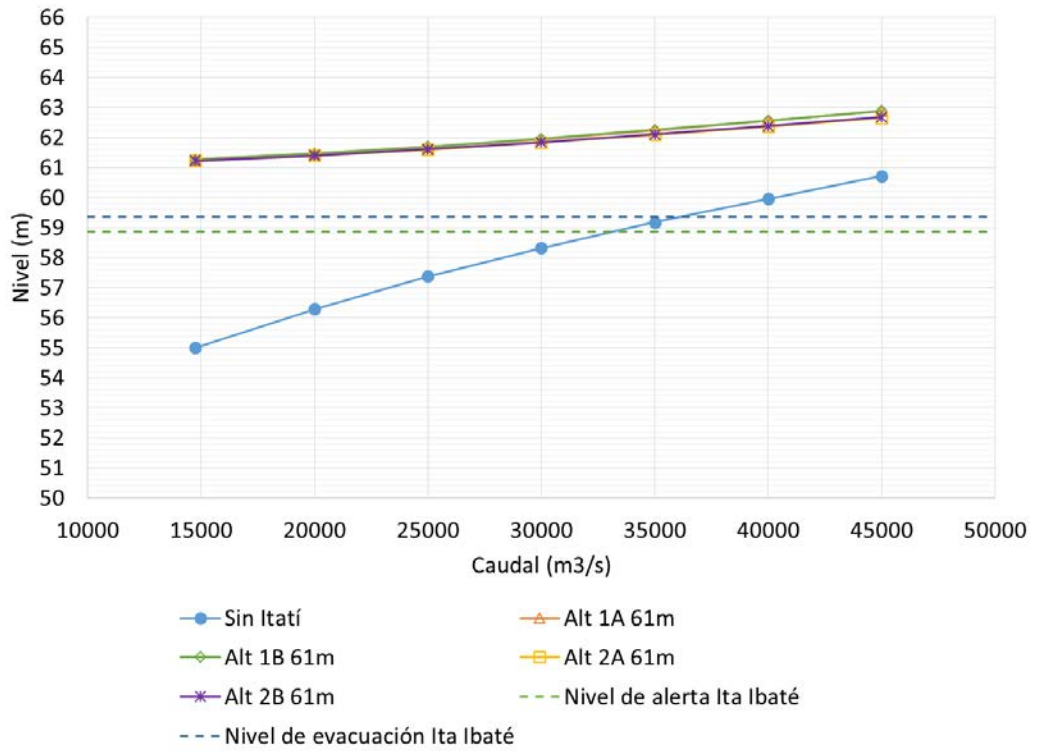


d) Ituzaingó y San Antonio

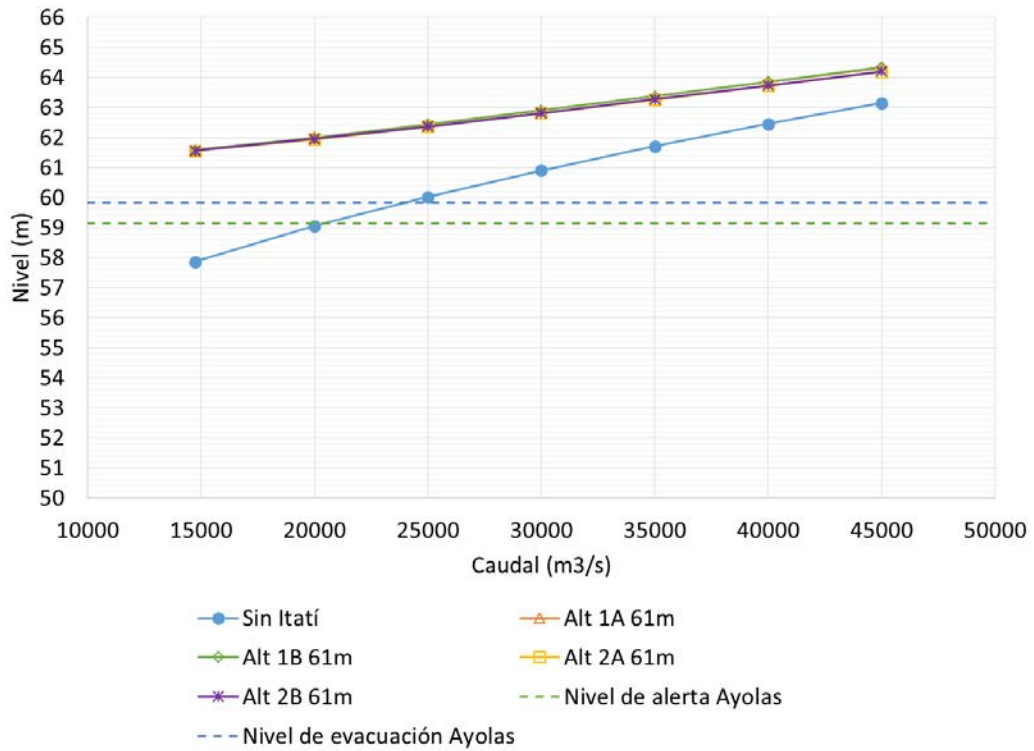
Figura 3.53. Efecto de remanso de Itatí-Itacorá a cota 59 m en varias localidades costeras



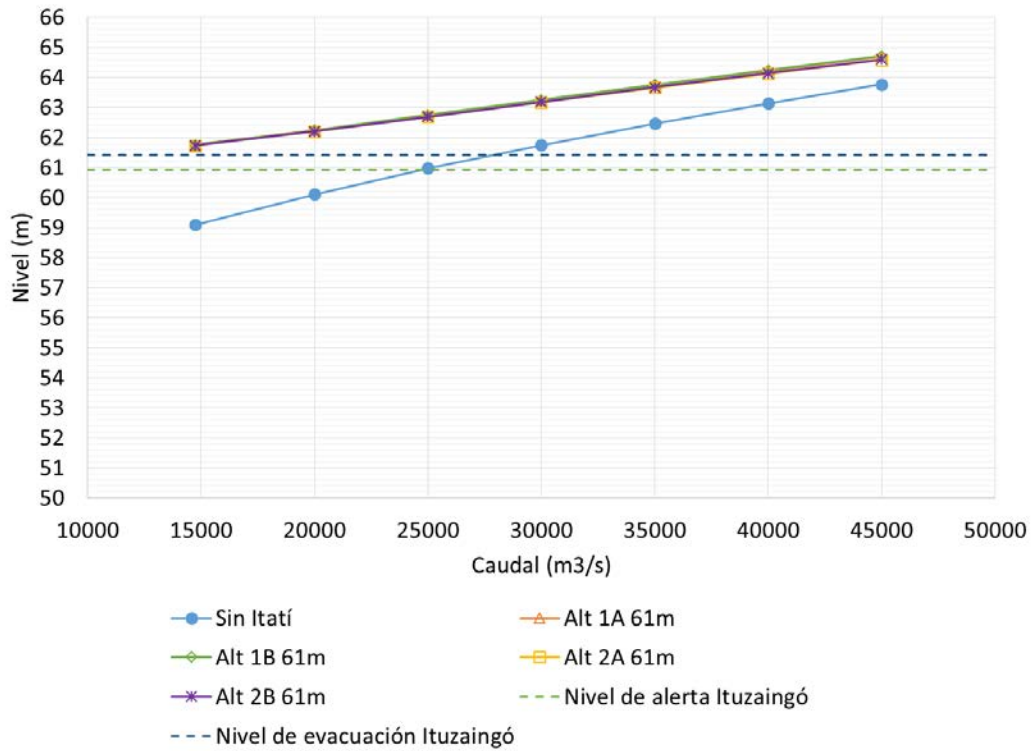
a) Yahapé y Cerrito



b) Ita Ibaté



c) Ayolas



d) Ituzaingó y San Antonio

Figura 3.54. Efecto de remanso de Itatí-Itacorá a cota 61 m en varias localidades costeras

Como era de esperarse, la sobreelevación producida por el embalse es mayor cuanto más cercana es la población al eje de la presa, y cuanto más bajo es el caudal. Además, las alternativas de cierre 1A y 1B producen niveles de afectación algo superiores a los de las alternativas 2A y 2B, sobre todo para caudales altos.

Se observa que ya con la alternativa a cota 59 m se alcanzaría el actual nivel de evacuación en las localidades de Ita Ibaté y Ayolas en forma permanente (**Figura 3.53**). En el caso de Ituzaingó esto se produciría para caudales mayores a aproximadamente 22.000 m³/s, pero también resultaría permanente con el embalse a cota 61 m (**Figura 3.54**).

3.13 Curvas clave

3.13.1 Datos escala hidrométrica de Itatí

La estación hidrométrica Itatí se encuentra ubicada sobre la margen del río Paraná en la ciudad homónima (**Figura 3.55**), con coordenadas 27°15'58,82688"S, 58°14'38,99209"O. La misma pertenece a la Red Hidrometeorológica Nacional y su identificación en la Base de Datos Hidrológicos Integrados (BDHI) de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación es 3862 – PARANÁ – ITATÍ.



Figura 3.55.Ubicación de estación hidrométrica Itatí.

La estación Itatí posee registros diarios de altura desde el 01/Jul/1910 al 31/Ago/2017, y 361 aforos de caudal entre el 24/Jul/1982 y el 05/May/2017.

La BDHI informó las siguientes curvas altura local (H, en m) versus caudal (Q, en m³/s) para la estación Itatí, obtenidas por ajuste para distintos períodos de tiempo (**Figura 3.56**):

- Válida desde 01/Ene/1910 hasta 31/Ago/2000
Desde H=0.00 hasta H=10.50 → $Q=255.7795 \cdot H^2 + 1037.038 \cdot H + 5278.571$
- Válida desde: 01/Set/2000 hasta 31/Ago/2002
Desde H=0.00 hasta H=8.90 → $Q=252.42 \cdot H^2 + 953.57 \cdot H + 6257$
- Válida desde: 01/Set/2002 hasta 31/Ago/2003
Desde H=0.00 hasta H=5.60 → $Q=187.5867 \cdot H^2 + 1595.8691 \cdot H + 5008.0475$
- Válida desde: 17/Dic/2003 hasta 31/Ago/2004
Desde H=0.00 hasta H=2.98 → $Q=3894.02865 \cdot 1.43002^H$
Desde H=2.98 hasta H=10.00 → $Q=183.78228 \cdot H^2 + 1705.04211 \cdot H + 4593.56857$
- Válida desde: 01/Set/2004 hasta 26/Feb/2006
Desde H=0.00 hasta H=5.98 → $Q=276.78274 \cdot H^2 + 978.08682 \cdot H + 5613.98579$
Desde H=5.98 hasta H=10.00 → $Q=183.78228 \cdot H^2 + 1705.04211 \cdot H + 4593.56857$
- Válida desde: 27/Feb/2006
Desde H=0.00 hasta H=3.14 → $Q=6006.55423 \cdot 1.22695^H$
Desde H=3.14 hasta H=5.98 → $Q=276.78274 \cdot H^2 + 978.08682 \cdot H + 5613.98579$
Desde H=5.98 hasta H=10.00 → $Q=183.78228 \cdot H^2 + 1705.04211 \cdot H + 4593.56857$

Se observa que las mayores diferencias entre ellas se dan para bajos y altos caudales.

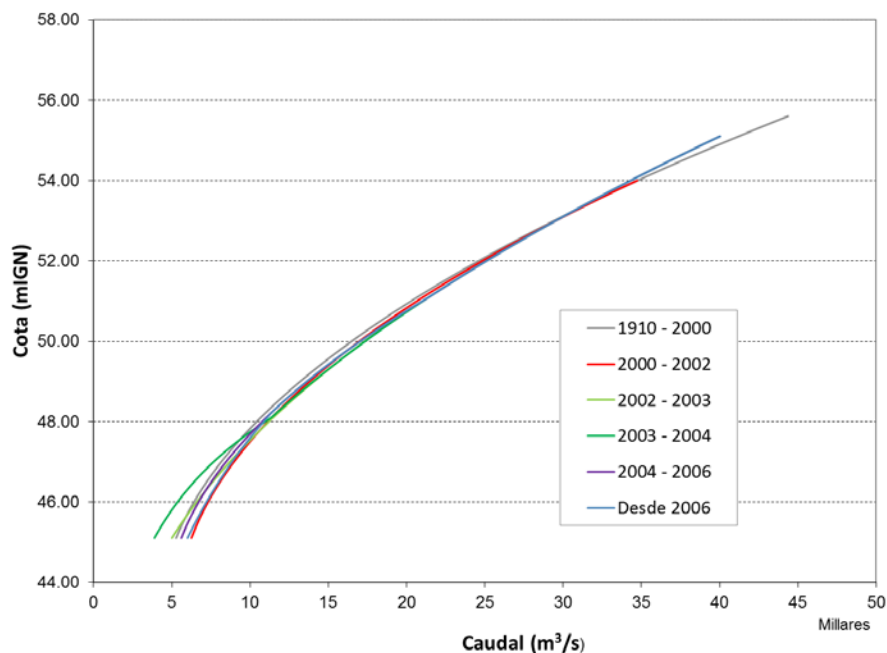


Figura 3.56. Curvas altura-caudal de la BDHI.

Se colectaron distintos valores de la cota altimétrica del cero de esta escala, correspondientes a diferentes fuentes, según se indica en la **Tabla 3.10**. Se observa que, en rigor, sólo se reportan 3 valores distintos: el de Motor Columbus y Asoc. (1979), luego usado por COMIP (1986); el de la Circular N° 33 del Proyecto Yacyretá (1980), luego usado por COMIP (1984), y el de la DNCPyVN (Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables, actualmente Dirección Nacional de Vías Navegables), luego usado por el INA (2013). En el marco del presente proyecto, la COMIP encargó una nueva nivelación de ese cero de escala, obteniéndose 45,266 mIGN. Estos 4 valores se grafican en la **Figura 3.57**. El segundo y tercero son casi coincidentes, el primero difiere de estos en -0,25 m y el cuarto en +0,17 m, diferencias que bien pueden considerarse representativas del error de medición.

Tabla 3.10. Cota de cero de escala de Itatí según la fuente.

Fuente	Cota
Motor Columbus y Asoc.(1979)	44,850 mIGN
Proyecto Yacyretá(1980)	45,100mIGN
COMIP (1984)	45,6565 mMOP (≈45,10 mIGN)
COMIP (1986)	44,850mIGN
DNCPyVN	45,104 mIGN
INA	45,104mIGN

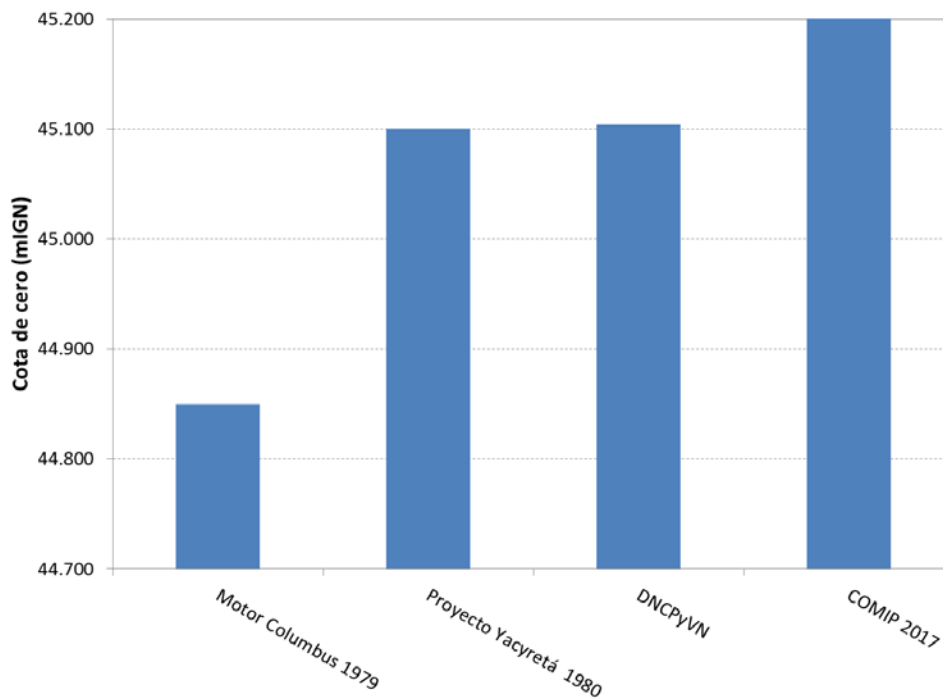


Figura 3.57. Cero de escala de Itatí de acuerdo a distintas fuentes.

3.13.2 Análisis de escala hidrométrica de Itatí

La EBY (Entidad Binacional Yacyretá informa en forma horaria los caudales erogados por la Central y sus dos vertederos (Brazo Aña Cua y Brazo Principal). Se dispuso de esta serie de datos para el período desde el 01/Ene/1995 hasta el 31/Dic/2014. En la **Figura 3.58** se representa la relación entre los caudales aforados en la estación Itatí y los erogados por Yacyretá (suma de lo descargado por Central y vertederos) para el mismo día. Como era de esperarse, se observa una relativamente alta correlación, aunque también resalta la relativamente alta dispersión de valores, que puede considerarse como un indicador de errores de medición, sobre todo asignables a los aforos en la estación Itatí, ya que los correspondientes a Yacyretá son más sistemáticos. Las diferencias entre ambos valores se representan en la **Figura 3.59**. Se observan muchos valores negativos, que indicarían caudales menores en Itatí que en Yacyretá, lo cual se considera una anomalía.

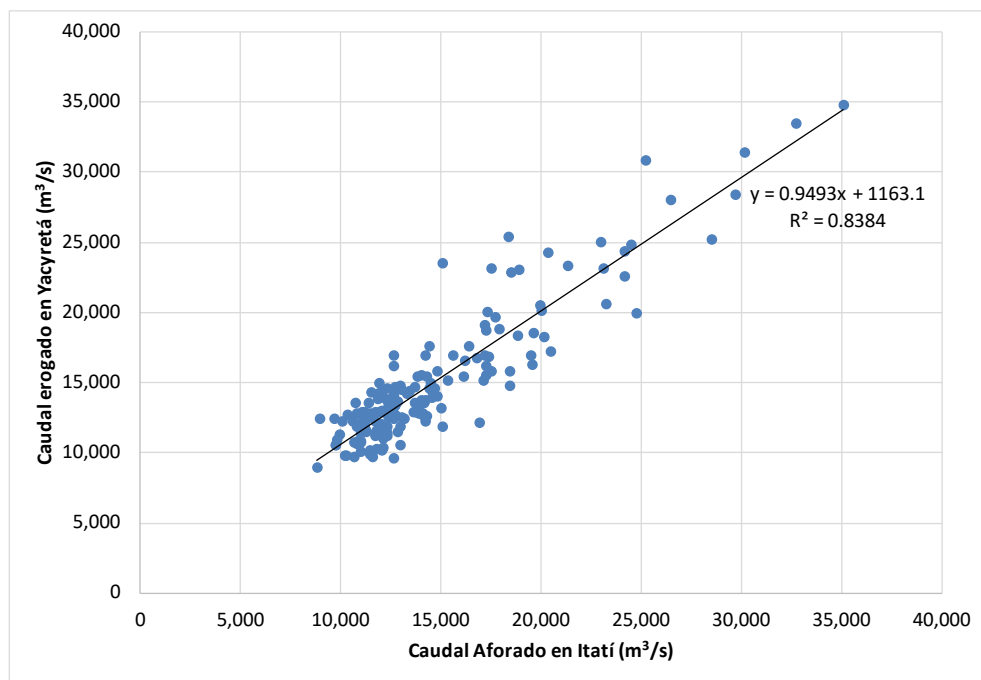


Figura 3.58. Caudales aforados en Itatí vs. caudales erogados por Yacyretá.

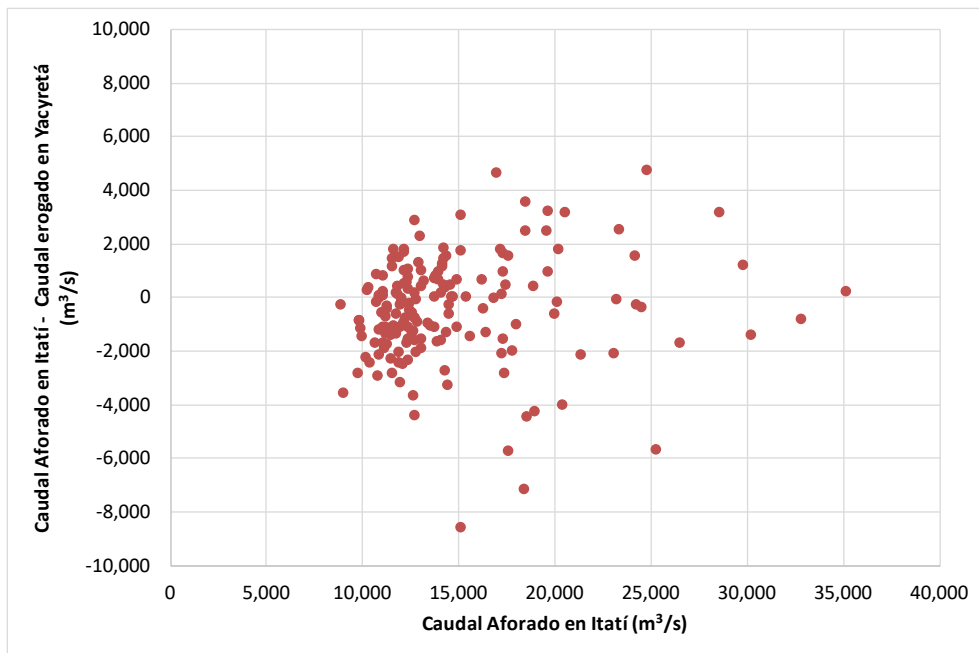


Figura 3.59. Diferencia entre caudales aforados en Itatí y caudales erogados por Yacyretá.

Se utilizaron los resultados del modelo MOAGAB actualizado para comparar sus predicciones con los caudales aforados en Itatí. Esto se muestra en la **Figura 3.60**, observándose una mejora considerable en la correlación entre ambos, ya que el coeficiente de determinación (R^2) sube desde 0,838 a 0,956. Esto era esperable, ya que el modelo tiene la capacidad de tener en cuenta el retraso y efectos de atenuación en el tramo entre Yacyretá e Itatí. Las diferencias se representan en la **Figura 3.61**. Se siguen observando valores negativos.

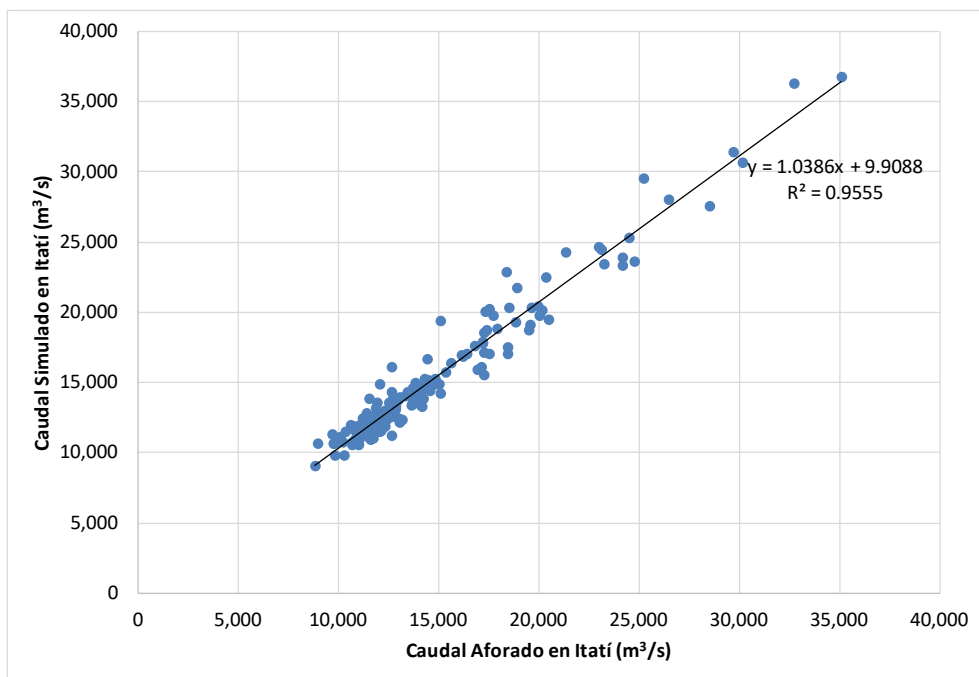


Figura 3.60. Caudales aforados en Itatí vs. caudales simulados con el modelo MOAGAB en Itatí.

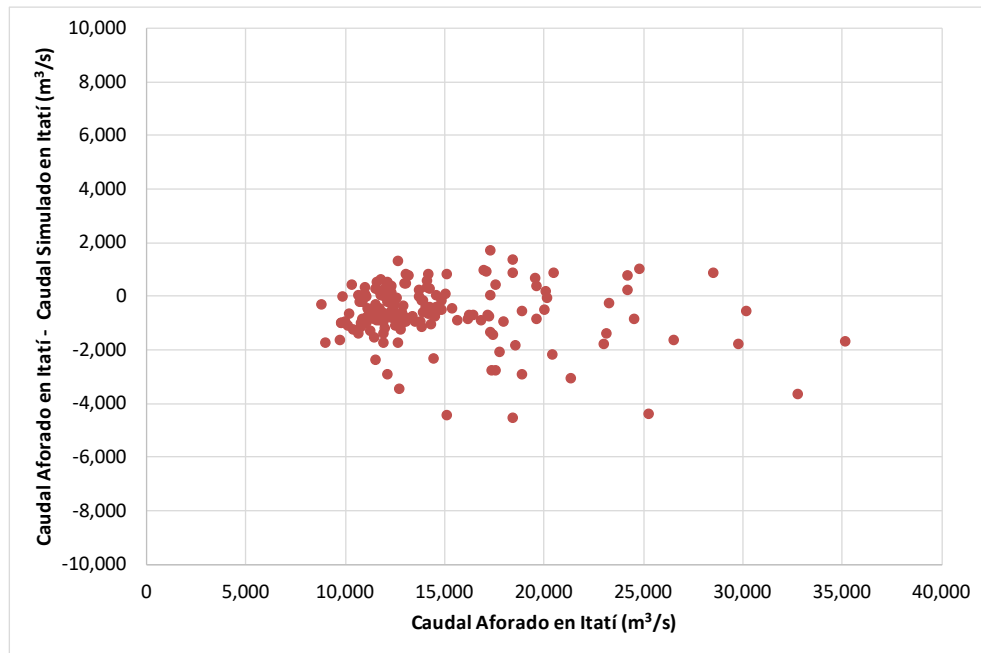


Figura 3.61. Diferencia de caudales aforados en Itatí y caudales simulados con el modelo MOAGAB en Itatí.

Se utilizaron los resultados diarios del modelo MOAGAB sobre la ventana de tiempo 01/Ene/1995 – 31/Dic/2013 para representar los caudales calculados en función de los niveles calculados, tal como se muestra en la **Figura 3.62**. Allí también se incluyen todos los aforos existentes en el período Jul/1982-Jul/2017 junto con la curva clave de la BDHI utilizada desde 2006. Adicionalmente, se presenta la curva de ajuste a los resultados del MOAGAB, cuya ecuación es:

$$Q = 322,596 \cdot H^2 + 797,669 \cdot H + 6.359,258$$

donde H es la altura local en el hidrómetro de Itatí.

Se observa que los resultados del modelo son muy consistentes con los aforos para los caudales más bajos, hasta aproximadamente 15.000 m³/s, salvo por unos pocos aforos por debajo de 8.000 m³/s que parecen adolecer de errores sistemáticos. Para caudales intermedios, hasta alrededor de 30.000 m³/s, la consistencia es razonable, aunque el centro de gravedad de los aforos tiende a desplazarse hacia caudales algo menores, para un dado nivel. Finalmente, para los caudales más altos, por encima de 30.000 m³/s, la tendencia de desplazamiento es bien definida.

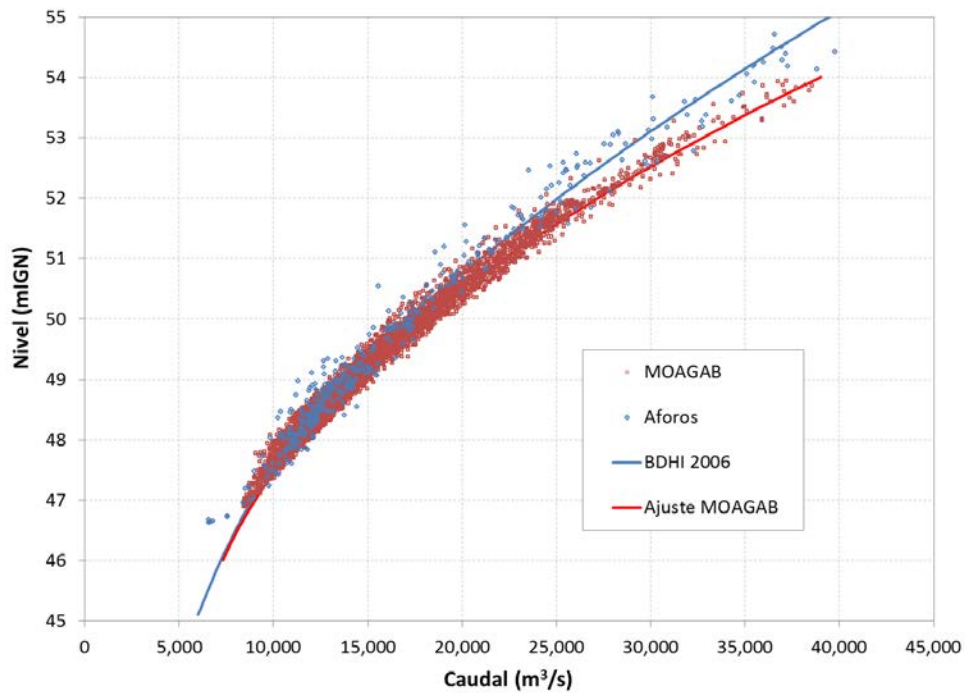


Figura 3.62. Relación altura-caudal de acuerdo al modelo MOAGAB, y aforos en Itatí.

Se construyeron curvas de volumen acumulado para el período 01-Ene-1995 a 31-Dic-2013 con los caudales informados por la EBY, los obtenidos en Itatí con la curva altura-caudal de la BDHI 2006, y los provenientes de la curva altura-caudal generada con el modelo MOAGAB (**Figura 3.63**). Se observa que el asociado a la curva altura-caudal de la BDHI subestima lo informado por la EBY, lo cual es una anomalía aún más significativa que la apuntada para los caudales más arriba. En cambio, los volúmenes obtenidos con la curva altura-caudal del modelo MOAGAB tienden a coincidir con los erogados por Yacyretá, lo cual de todos modos era esperable por su propia construcción.

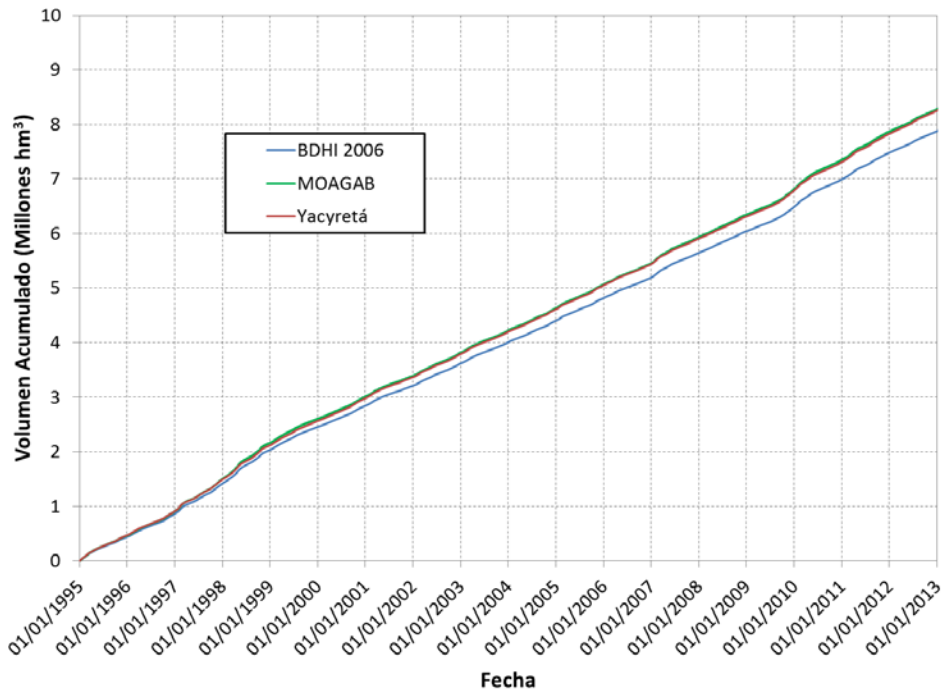


Figura 3.63. Curvas de volúmenes acumulados erogados por Yacyretá y calculados con las curvas altura-caudal de BDHI y de MOAGAB.

Del análisis efectuado se concluye que los aforos de caudal para grandes crecidas en la sección Itatí-Itacorá del río Paraná adolecen de una subestimación sistemática. Esto podría explicarse por la dificultad para aforar sobre la planicie de inundación de la margen paraguaya, donde existen paleocauces capaces de transportar caudales significativos. En consecuencia, al presente se considera que la curva altura-caudal más confiable para la escala de Itatí es la que surge del ajuste a los resultados del modelo MOAGAB. Esta es la que se tomará como curva clave en Itatí-Itacorá para este estudio.

3.13.3 Otras curvas clave

Para el cálculo de las estructuras de las presas del cierre Itatí-Itacorá se requiere conocer las curvas clave altura-caudal en las secciones de implantación. Su ubicación se muestra en la **Figura 3.64**. Para obtener las curvas se utilizó el modelo 1D actualizado con las nuevas secciones en ausencia de las presas.

La **Figura 3.65** presenta las curvas claves determinadas con el modelo hidrodinámico para la sección Itatí y los dos cierres propuestos, para caudales (en régimen permanente) desde 10.000 m³/s hasta 95.000 m³/s, con paso cada 5.000 m³/s.

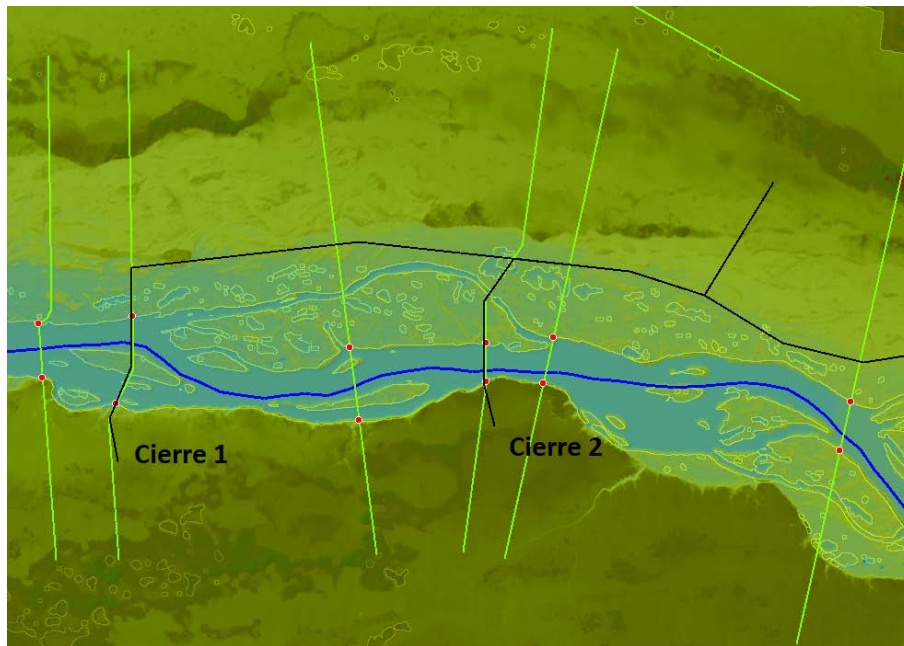


Figura 3.64. Ubicación de las 2 alternativas de cierre.

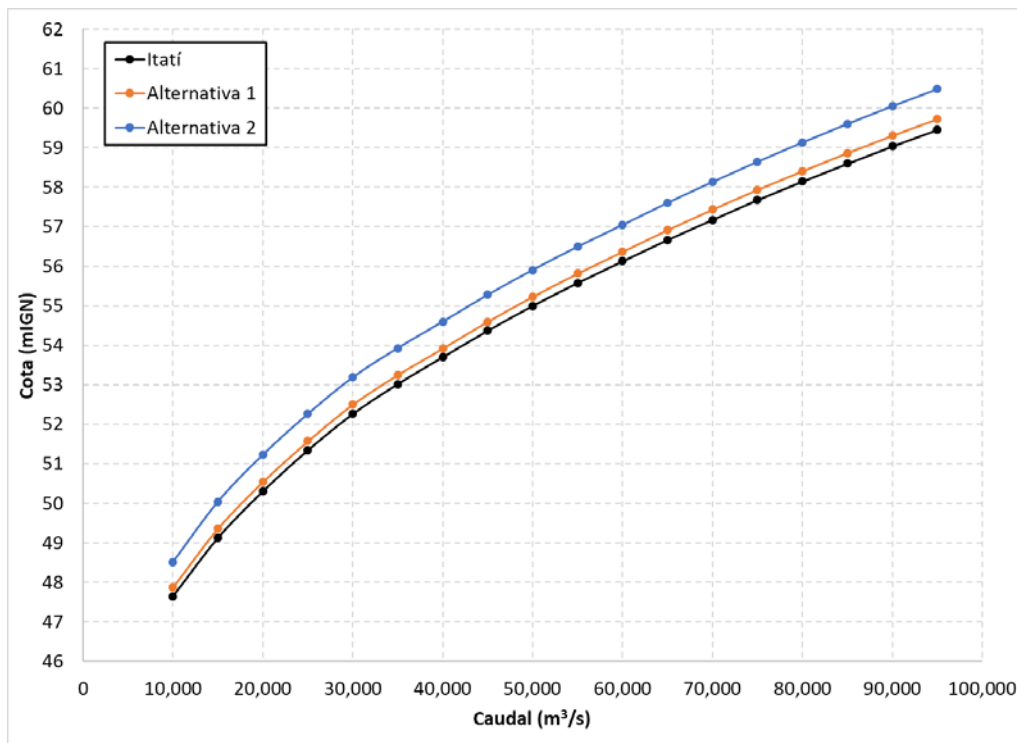


Figura 3.65. Curva clave en Itatí y los dos cierres propuestos.

4 ANÁLISIS SEDIMENTOLÓGICOS Y DE EROSIÓN

4.1 Consideraciones generales

Asociado a los cambios hidrodinámicos, el cierre Itatí-Itacorá generará efectos sobre el transporte y deposición de sedimentos, y sobre las condiciones erosivas. Estos efectos se estudiaron utilizando resultados de modelación. En las secciones siguientes se describen los problemas analizados.

4.2 Deposición de sedimentos finos en el embalse Itatí-Itacorá

4.2.1 Planteo del problema

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

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

4.2.2 Antecedentes

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

En lo referente a la caracterización del sedimento suspendido, en ese estudio se halló una relación entre el caudal del río y el diámetro medio d_{50} del sedimento en el tramo entre la estación Calendaria y el cierre de Yacyretá, la cual se presenta en la **Figura 2.3**. Se observa que el diámetro del sedimento crece con el caudal, y que para caudales cercanos al medio el d_{50} es del orden de 7 μm .

Otro resultado relevante es el caudal sólido de sedimento suspendido que fluye desde el embalse Yacyretá. Este se cuantificó para distintas fechas, obteniéndose los resultados mostrados en la **Tabla 4.1**.

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

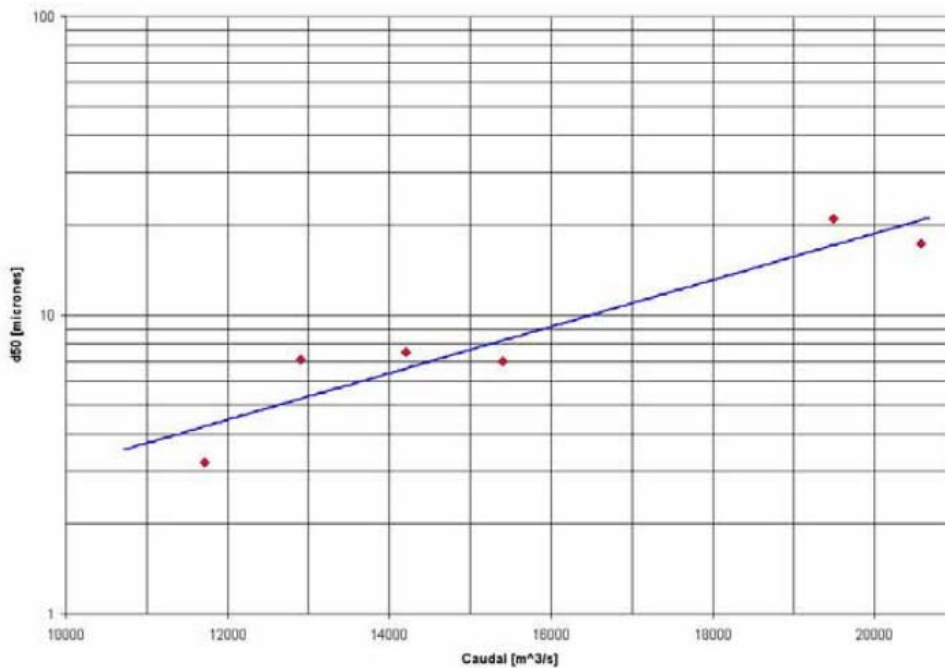


Figura 4.1. Relación entre el caudal del Paraná y el diámetro medio del sedimento suspendido (INA, 2004).

Tabla 4.1. Caudal sólido suspendido entrante y saliente del embalse Yacyretá (INA, 2004).

Fecha	Caudal Sólido Saliente de Yacyretá (kg/s)	Caudal Líquido Saliente de Yacyretá (m³/s)
24/Abr/1998	345.17	20574
21/Sep/1998	136.64	19496
04/Abr/1999	72.19	15400
14/Ene/2000	65.62	11711
25/Oct/2000	63.95	14200

Existe otro informe antecedente realizado por NHC & EVARSA (2002), en el cual se calcularon por distintos métodos las tasas de erosión específicas para la subcuenca del río Paraná comprendida entre los cierres Itaipú y Yacyretá. Los resultados presentados en dicho informe se resumen en la **Tabla 4.2**. Se observa una gran variabilidad en las estimaciones por distintos métodos. Se considera que estas tasas específicas pueden ser representativas para la subcuenca ubicada entre Yacyretá y el cierre Itatí-Itacorá, aunque posiblemente inferiores dada la menor pendiente del terreno en este tramo. Dado que dos metodologías diferentes (Walling & Webb y Fleming & Kadhimi) proveyeron resultados similares, y que además se esperarían menores tasas en esta zona, se seleccionó como representativo un valor menor al promedio, a saber, 100 ton/km²/año.

Tabla 4.2. Tasas de erosión específicas para la subcuenca del río Paraná entre Itaipú y Yacyretá (NHC & EVARSA, 2002).

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

4.2.3 Implementación del modelo

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

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

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

La batimetría del modelo se construyó combinando el MDE (Modelo Digital de Elevación) del modelo hidrodinámico MOAGAB, que se extiende desde el cierre Yacretá hasta la estación Ita Ibaté, con el MDE generado para el modelo de olas (ver capítulo 5) desde aguas abajo de esta estación. La batimetría obtenida se presenta en la **Figura 4.2**. Allí también se observa el dominio del modelo, que se extiende desde la presa Itatí-Itacorá, en su alternativa de cierre 1A, hasta la presa Yacretá, incluyendo un tramo de 6 km del brazo Aña Cuá. Este dominio de cálculo se discretizó en una malla de celdas cuadradas de 200 m de lado.

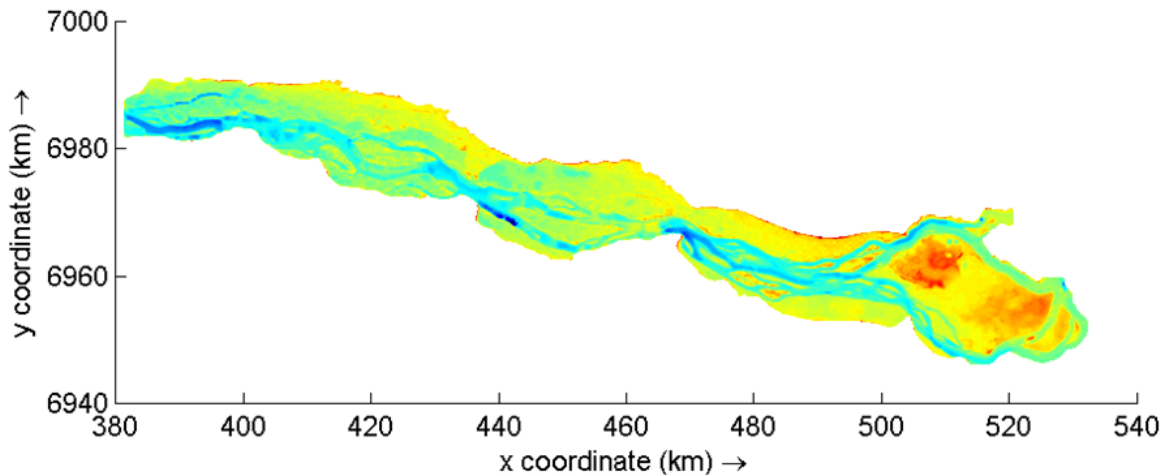


Figura 4.2. Dominio y batimetría del modelo hidrosedimentológico del embalse Itatí-Itacorá.

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

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

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

Se introdujo también al modelo un aporte sólido lateral estimado para las principales subcuencas de margen izquierda: Yabebry, Jaguary, Atinguy y Aguapey. Al multiplicar el área de cada subcuenca por la tasa de $100 \text{ ton/km}^2/\text{año}$ establecida en la sección anterior, se obtuvieron las cargas sólidas que se presentan en la **Tabla 4.3**.

Tabla 4.3. Aporte sólido para las subcuencas de margen izquierda.

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

En el caso de las subcuencas Yabebyry y Jaguary, que descargan al embalse en la zona modelada, los aportes se introdujeron como una carga sólida en el punto en que estos arroyos ingresan al embalse. En el caso del Atinguy y el Aguapey, que descargan en el Brazo Aña Cuá aguas arriba del borde superior del modelo, la carga sólida fue repartida de manera uniforme en todo el ancho del río. De esta manera, la concentración de sedimento en el borde del modelo del brazo Aña Cuá resultó incrementada de 4,6 g/m³ (correspondiente al vertido por Yacyretá) a 12,6 g/m³.

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

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

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

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

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

4.2.4 Resultados

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

En la **Figura 4.3** se presenta el perfil de concentraciones de sedimento suspendido para el embalse Itatí-Itacorá a cota 61 m. En la casi todo el embalse se observan concentraciones cercanas a 5 mg/l, con una reducción muy gradual en la dirección longitudinal. El A° Yabebyry genera una pluma de turbidez sobre la margen, con concentraciones máximas más elevadas, del orden de 10 mg/l, pero esta se atenúa por dilución en forma relativamente rápida, sobre una distancia del orden de 30 km. Las concentraciones más elevadas ingresantes desde el brazo Aña Cuá se atenúan en la confluencia con el brazo Principal.

La **Figura 4.4** muestra la tasa de deposición para el embalse a cota 61 m. Se observan tasas casi despreciables sobre el curso principal del río, pero que pueden llegar hasta aproximadamente 8 mm/año en extensas zonas que en condiciones naturales pertenecen a la planicie de inundación del río, sobre todo sobre la margen derecha, así como sobre la isla Apipé. En la zona de margen derecha, aguas abajo de la desembocadura del A° Yabebyry, se distinguen algunas pequeñas zonas de deposición significativa concentrada, con tasas de hasta 2 cm/año. Estas tasas de deposición están asociadas al aporte lateral del arroyo Yabebyry.

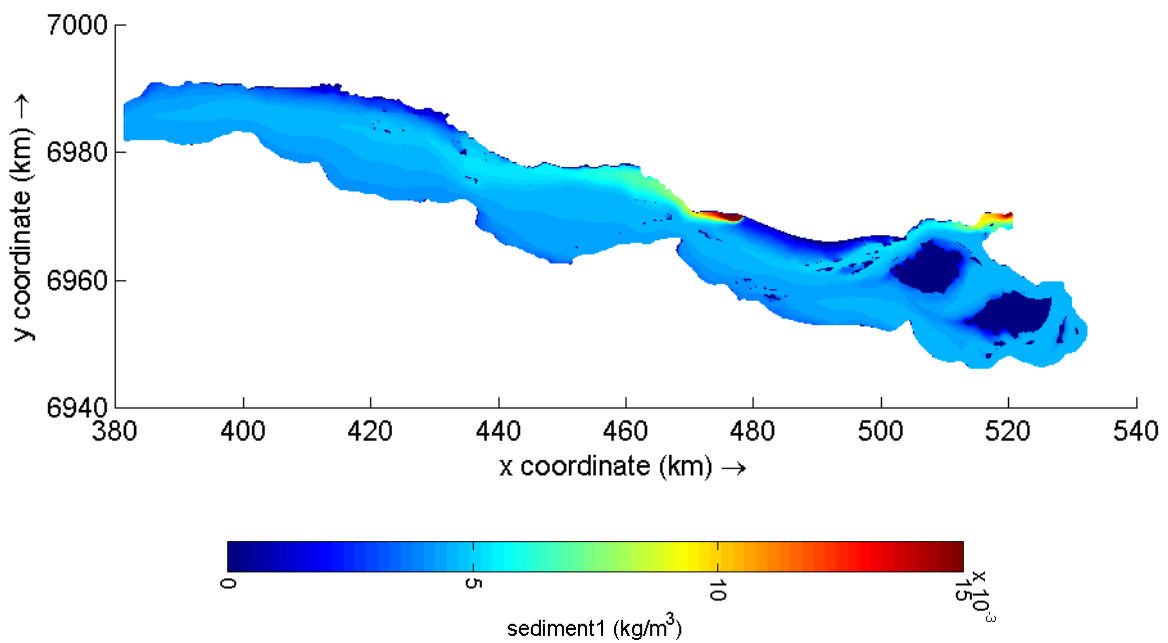


Figura 4.3. Perfil de concentraciones de sedimento suspendido para condiciones medias, nivel de embalse 61 m.

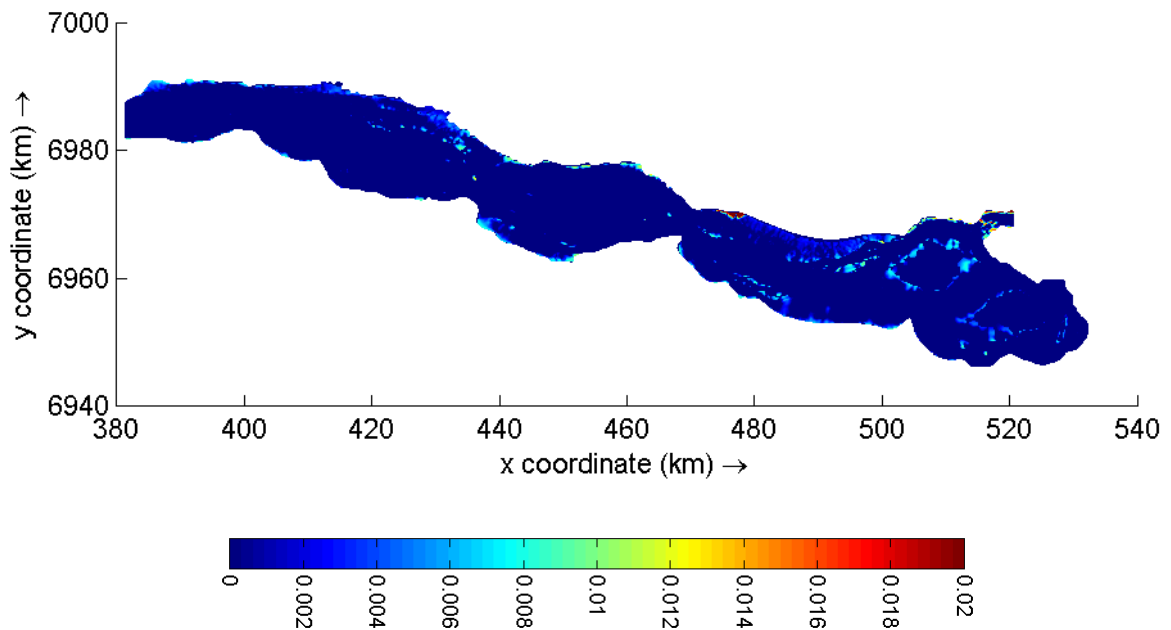


Figura 4.4. Tasa de deposición (m/año) para condiciones medias, nivel de embalse 61 m.

En la **Figura 4.5** se presenta el perfil de concentraciones de sedimento suspendido para el embalse Itatí-Itacorá a cota 59 m. Se observa un patrón cuali-cuantitativo similar al caso de 61 m. Hay que tener en cuenta que algunas de las zonas coloreadas en azul oscuro sobre la margen derecha no se inundan con nivel de 59 m, por lo que el modelo indica concentraciones de sedimento nulas.

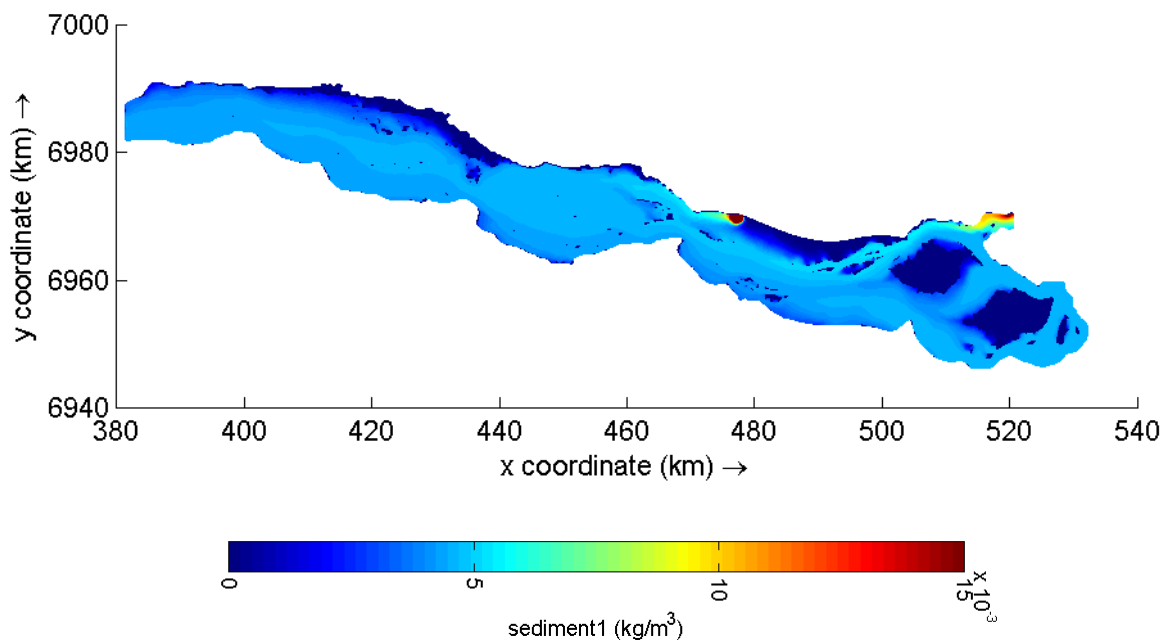


Figura 4.5. Perfil de concentraciones de sedimento suspendido para condiciones medias, nivel de embalse 59 m.

En la **Figura 4.6** se presenta la tasa de deposición para el embalse a cota 59 m. Si bien las tasas continúan en el mismo orden que el caso de cota 61 m, se observa una reducción de las zonas con deposición más significativa sobre las planicies de inundación, lo cual era de esperarse por el incremento de la dinámica. Por la misma causa, la zona de sedimentación por el aporte del A^o Yabebyry se concentra aún más cerca de su desembocadura.

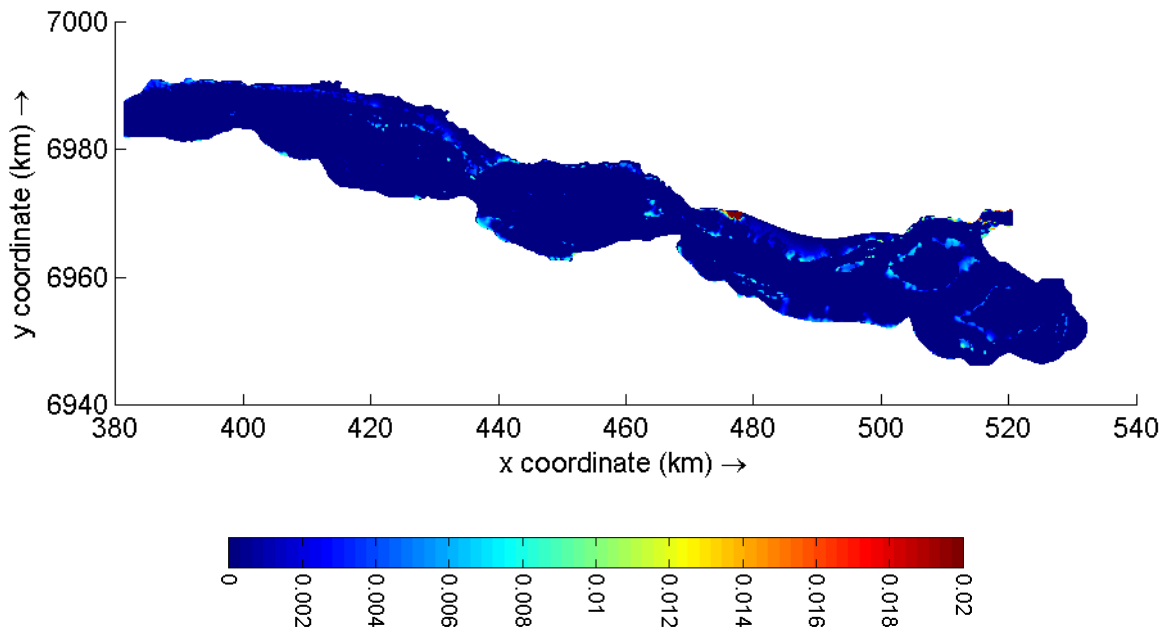


Figura 4.6. Tasa de deposición (m/año) para condiciones medias, nivel de embalse 61 m.

4.2.5 Sensibilidad de los resultados

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

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

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

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

4.3 Erosión aguas abajo del cierre Itatí-Itacorá

4.3.1 *Planteo del problema*

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

4.3.2 *Análisis de antecedentes*

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

En la campaña de investigaciones geotécnicas de 1975 se tomaron muestras en distintos puntos de la sección propuesta para la construcción de la presa de Itatí-Itacorá (**Figura 4.7**). Los más relevantes a los fines del presente análisis son los puntos R6 y R8, ubicados en el lecho del río Paraná. Los puntos P1 a P5 se encuentran sobre la costa Paraguaya, R7 en una isla del río y A9 a A11 sobre la margen argentina.

Las curvas granulométricas superficiales de los puntos R6 y R8 destacan las características mal graduadas de las arenas y areniscas, con un diámetro medio d_{50} de alrededor de 300 μm (**Figura 4.8**). A mayor profundidad se observó la presencia de arenas gruesas y gravas finas.

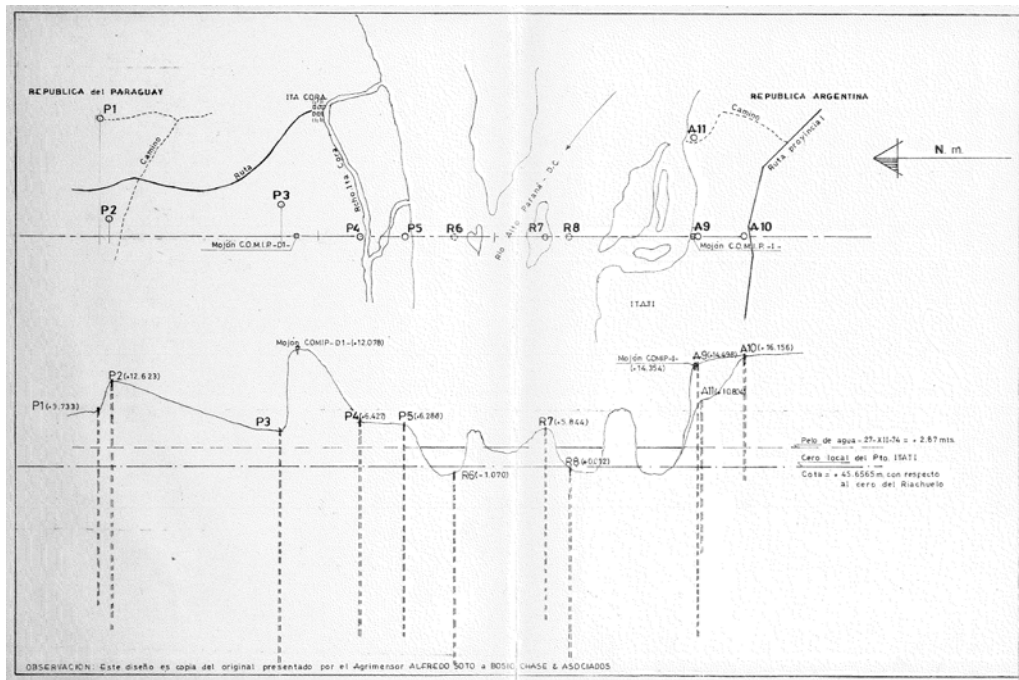
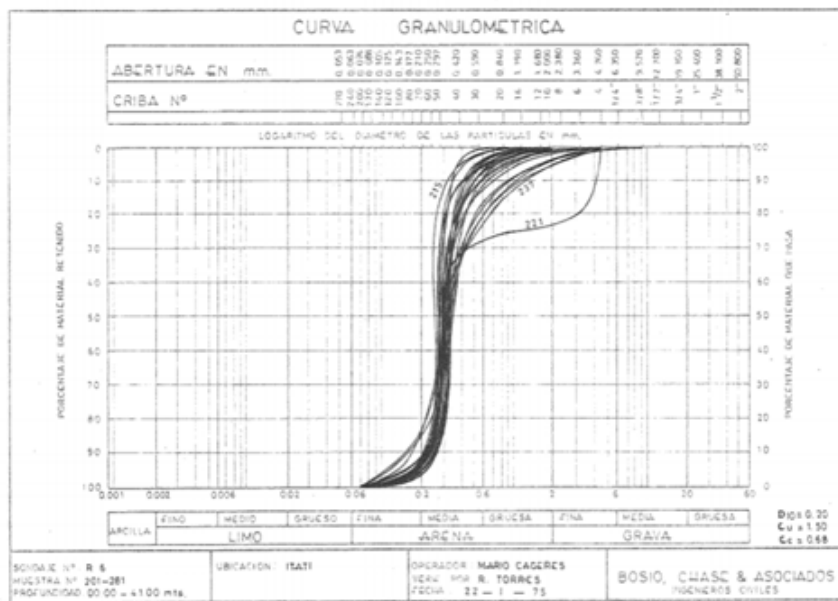


Figura 4.7. Ubicación de puntos relevados en la campaña de 1975.



a) R6

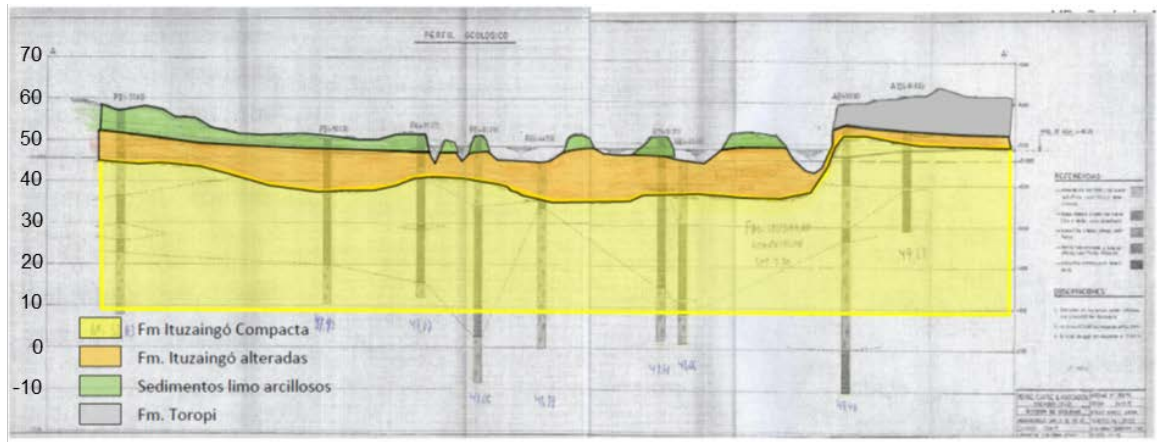


Figura 4.9. Perfil geológico interpretativo, visto desde aguas abajo, en el eje original del proyecto Itatí Itacora, entre los sondeos P2 y A10.

La **Figura 4.10** muestra la cota del fondo del talweg de acuerdo al relevamiento de Itaipú Binacional (2017). Sobre esos datos se ha planteado una franja media probable de ubicación del techo del estrato consolidado, siguiendo la pendiente media del fondo. Cerca del cierre de Alternativa 2 parece existir una profundización de ese techo.

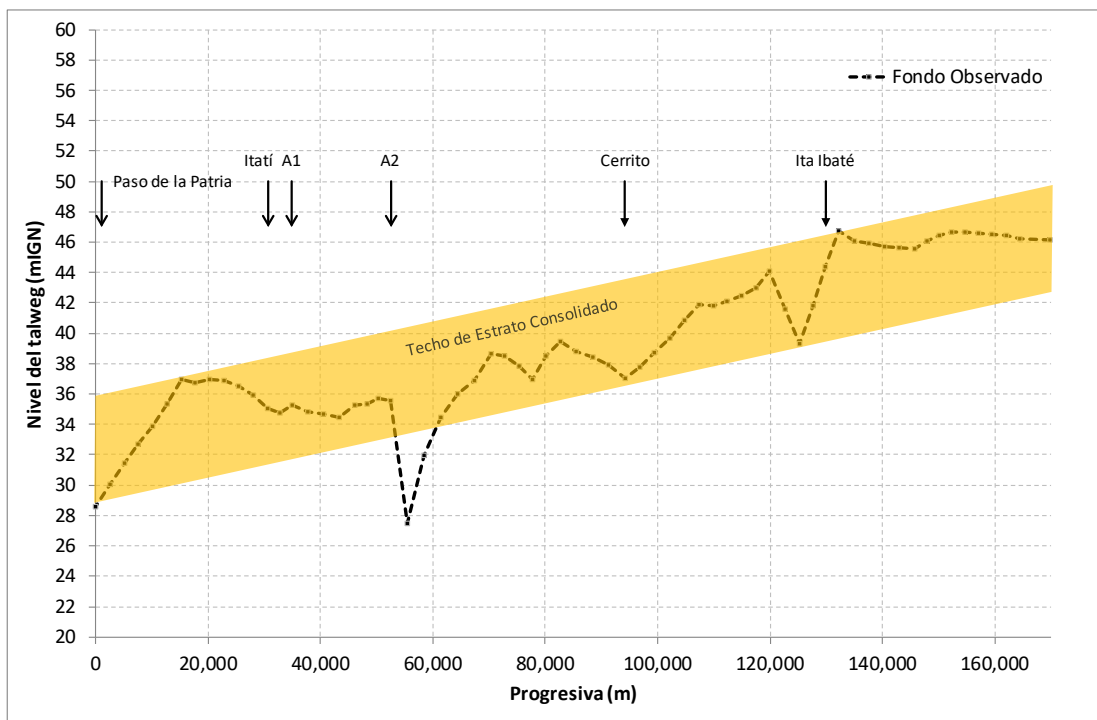


Figura 4.10. Cota del lecho del río en las secciones relevadas por Itaipú (2017).

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

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

4.3.3 Evolución para fondo no consolidado

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

El dominio del modelo se extiende desde los cierres propuestos (Alternativa 1 y Alternativa 2) hasta la ciudad de Paso de Patria. La geometría del modelo se construyó utilizando las secciones transversales relevadas recientemente (Itaipú, 2017). Para el caso de la Alternativa 1 se utilizaron un total de 4 secciones relevadas, mientras que para la Alternativa 2 se incluyeron 6 secciones. Para lograr una representación más continua de los procesos morfológicos, se interpolaron secciones transversales intermedias con un espaciamiento de 3 km, por lo que en total se trabajó con 15 secciones para la Alternativa 1 (**Figura 4.11**) y 22 para la Alternativa 2 (**Figura 4.12**).

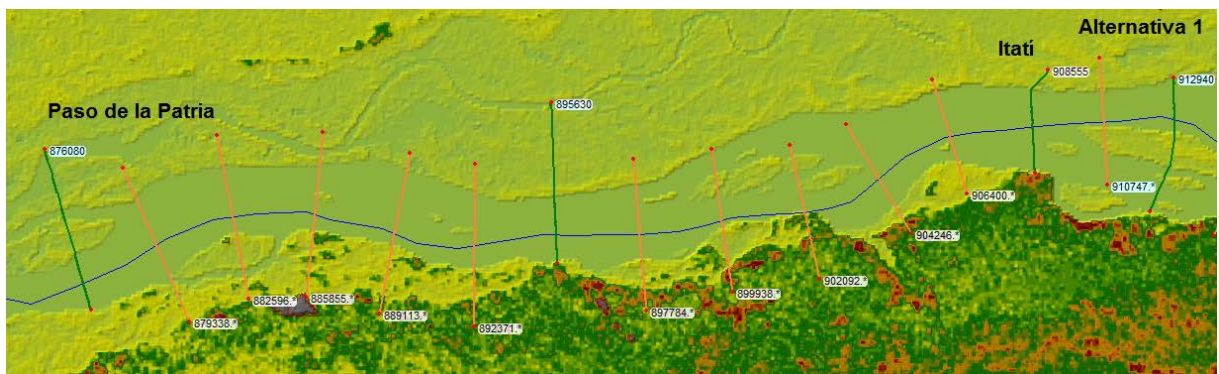


Figura 4.11. Secciones del modelo de la Alternativa 1.

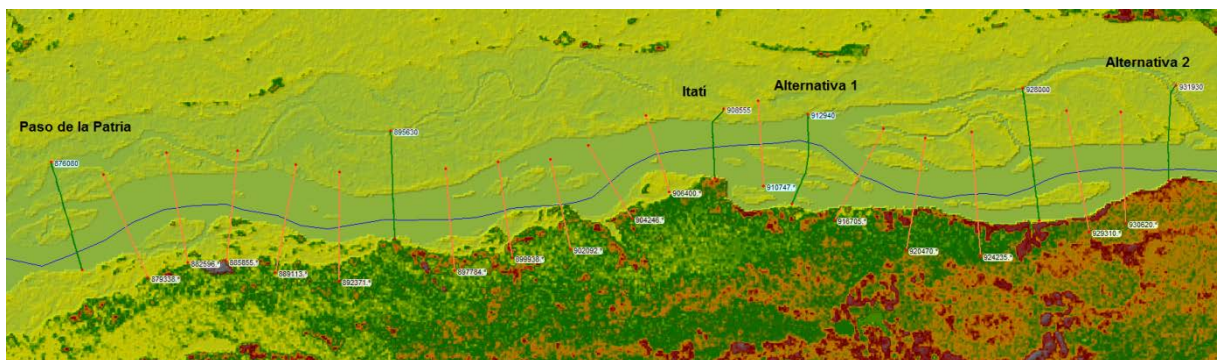


Figura 4.12. Secciones del modelo de la Alternativa 2.

Adicionalmente, se construyó un tercer modelo que va desde Ita Ibaté hasta Paso de la Patria con el fin de verificar la estabilidad morfológica del perfil obtenido en los relevamientos (**Figura 4.13**).

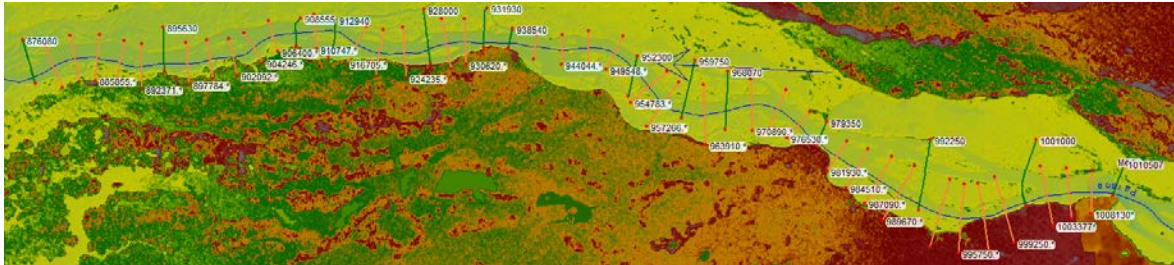


Figura 4.13. Secciones del modelo ampliado hasta Ita Ibate

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

Para caracterizar el sedimento de fondo se utilizó curva granulométrica discreta mostrada en la **Figura 4.19**, representativa de las curvas granulométricas medias para los puntos R6 y R8.

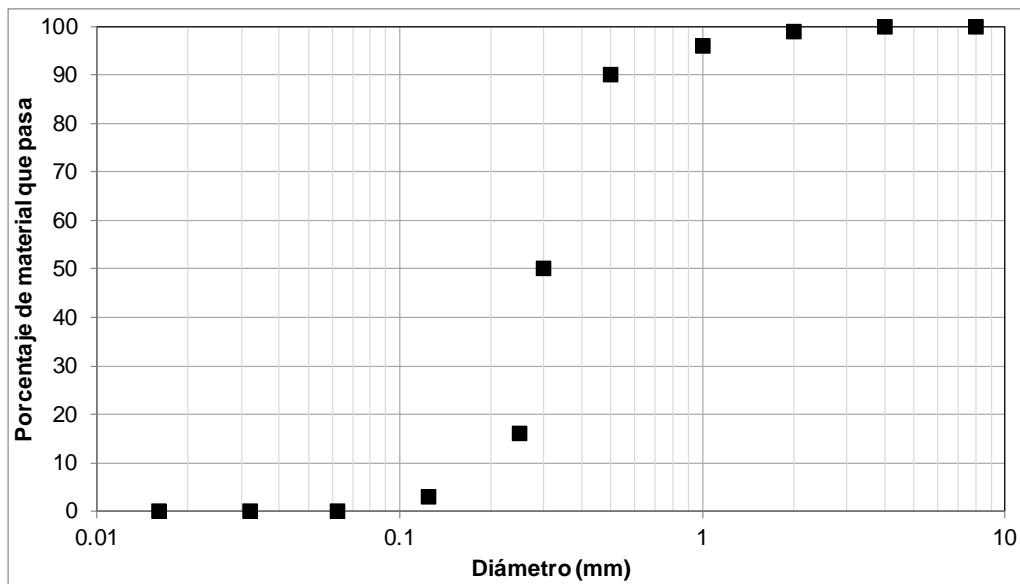


Figura 4.14. Curva granulométrica utilizada en la modelación.

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

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

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

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

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

En primer lugar se analizó el caso sin presa con el fin de verificar la estabilidad morfológica del perfil obtenido en los relevamientos. Se supuso condiciones de equilibrio en el borde de aguas arriba, manteniéndose entonces fija la cota de fondo. Se observó que se produce una evolución del nivel de fondo (**Figura 4.15**), alcanzándose condiciones de equilibrio luego de alrededor de 20 años de simulación. Sin embargo, los cambios de nivel de fondo resultantes son relativamente pequeños, lo que es una indicación de que la situación actual sería de cuasi equilibrio en todas las secciones aún si el estrato no fuera consolidado.

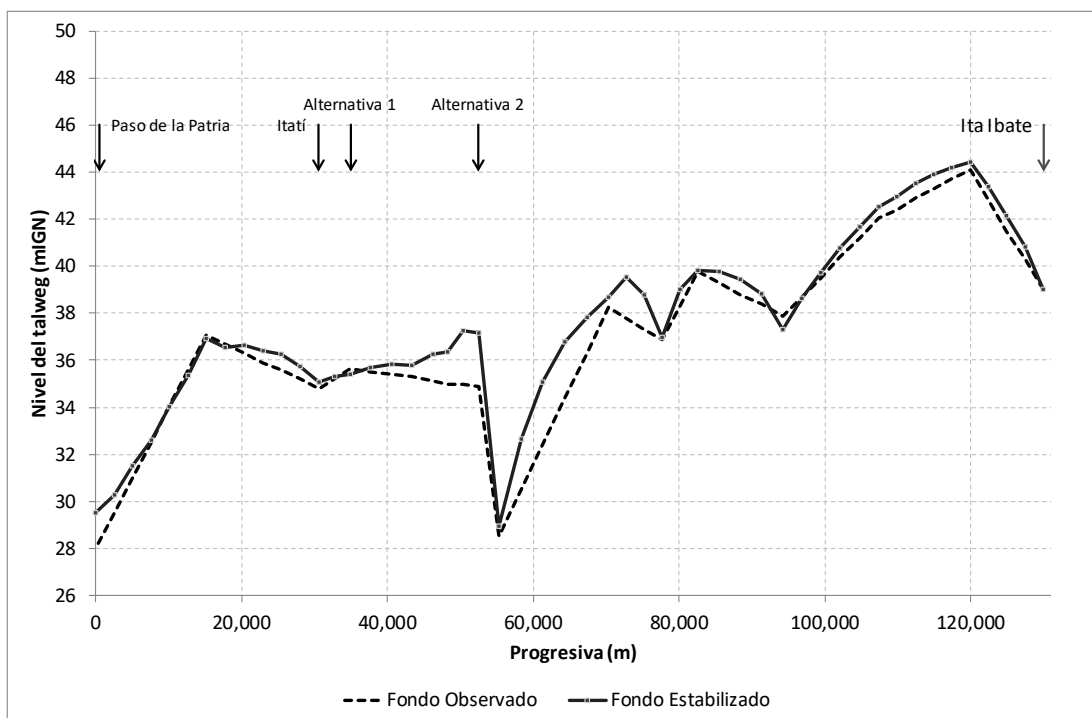


Figura 4.15. Progresión morfológica del talweg del río para condiciones naturales.

Luego se realizaron las simulaciones incluyendo la presa de Itatí-Itacorá, lo cual se logra imponiendo concentración de sedimento nulo en esa sección (que equivale a considerar caudal sólido nulo). Para la Alternativa 1 (**Figura 4.16**) se observa un descenso del lecho de aproximadamente 10 metros a los 100 años, mientras que para la Alternativa 2 (**Figura 4.17**) el descenso es de 13 metros. En ambos casos se observa que este descenso se manifiesta como una onda de erosión que se desplaza hacia aguas abajo. En ambas figuras también se ha representado la franja media probable del techo del estrato consolidado, que sería el limitador natural de la erosión.

En la **Figura 4.18** y **Figura 4.19** se presenta la evolución de la erosión en la primera sección aguas abajo de la presa durante los 100 años de simulación para ambas alternativas. Como era de esperarse, la tasa de erosión es más significativa durante la primera década, disminuyendo con el tiempo hasta alcanzar una tasa del orden de 5 cm/año. Una tal erosión al pie atentaría contra la estabilidad de la presa, de modo que resulta vital efectuar estudios de suelo que corroboren que existe un estrato consolidado capaz de resistir a la erosión.

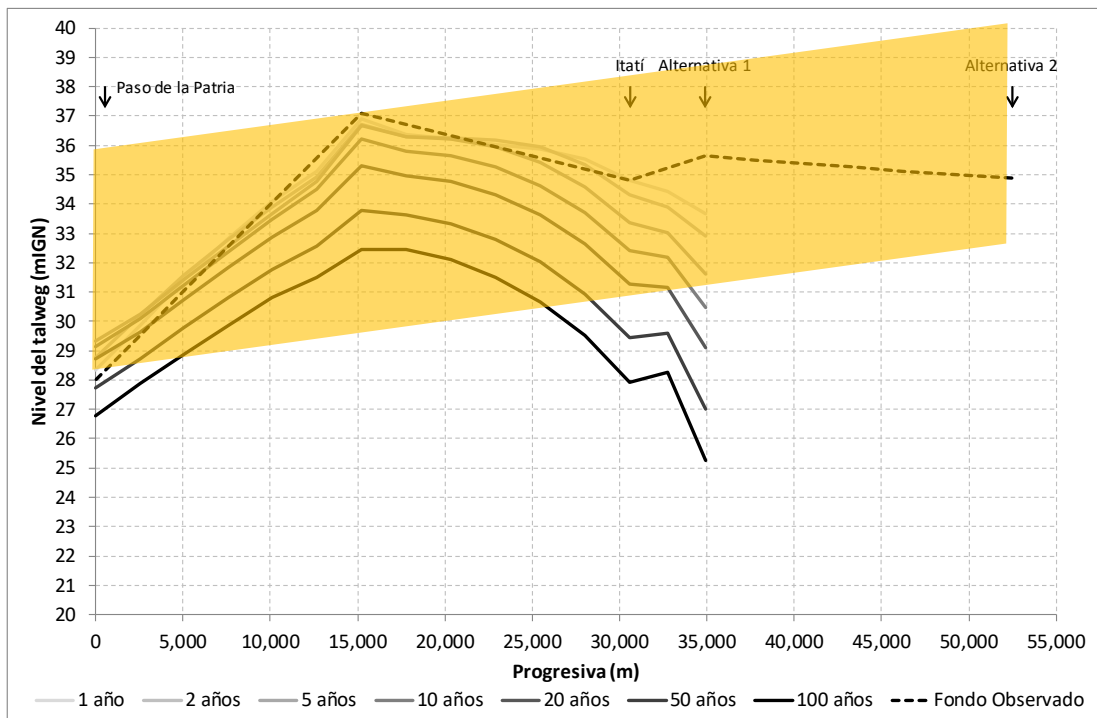


Figura 4.16. Progresión morfológica del talweg del río para la Alternativa 1.

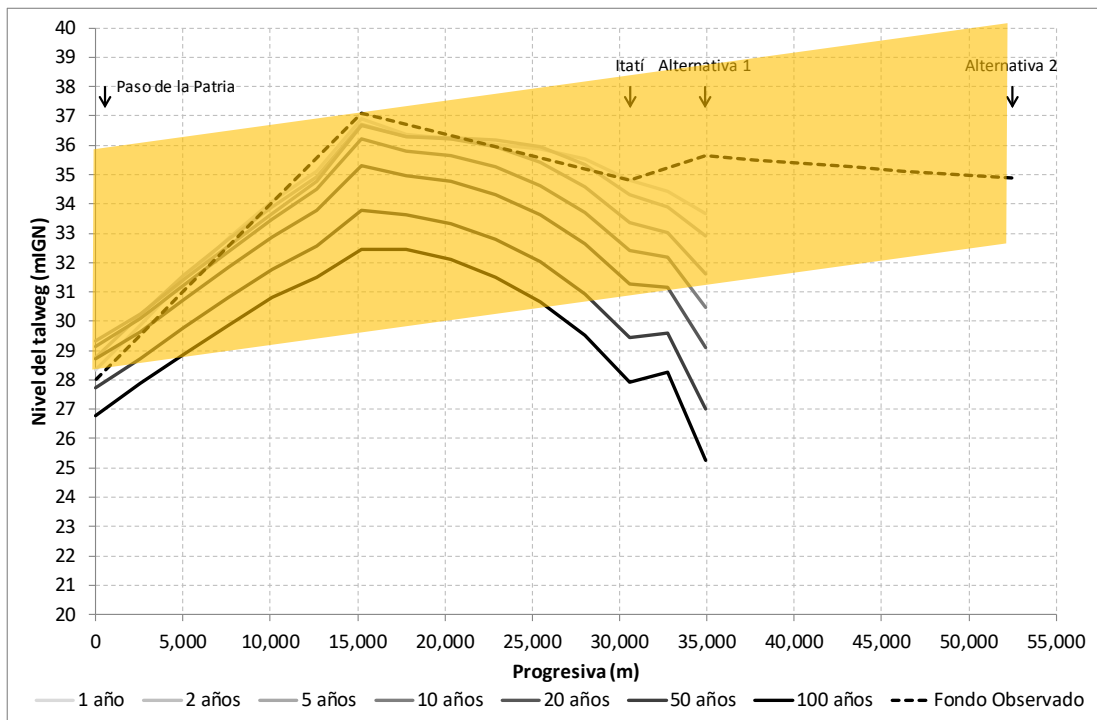


Figura 4.17. Progresión morfológica del talweg del río para la Alternativa 2.

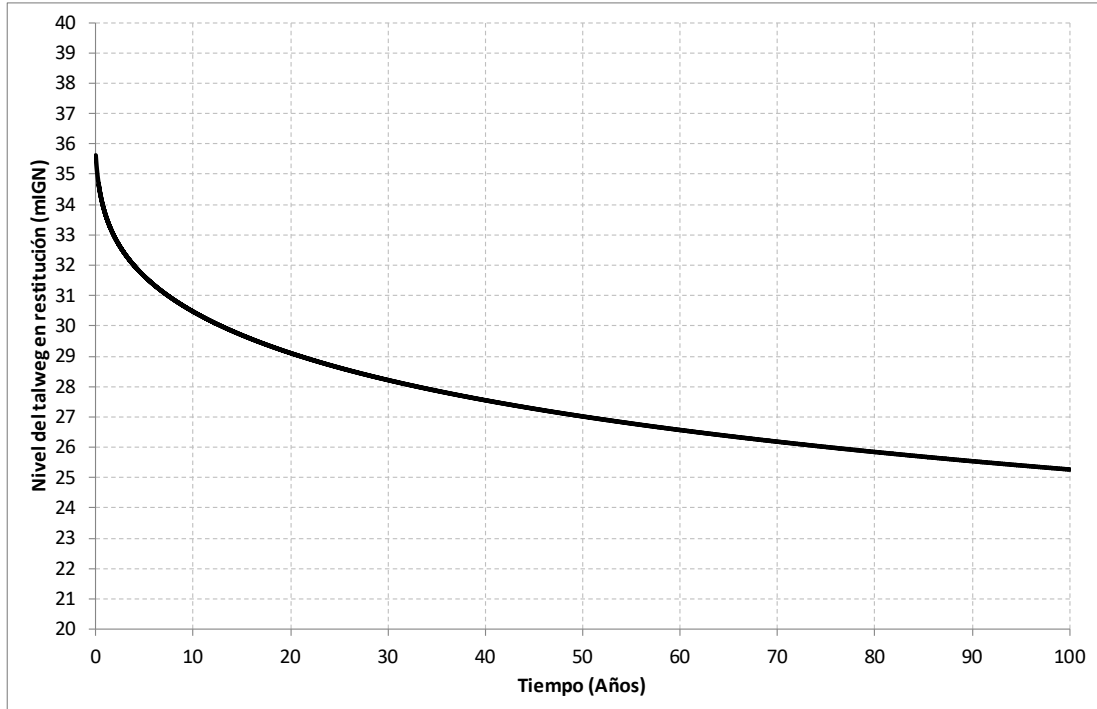


Figura 4.18. Evolución temporal del nivel del talweg en la restitución para la Alternativa 1.

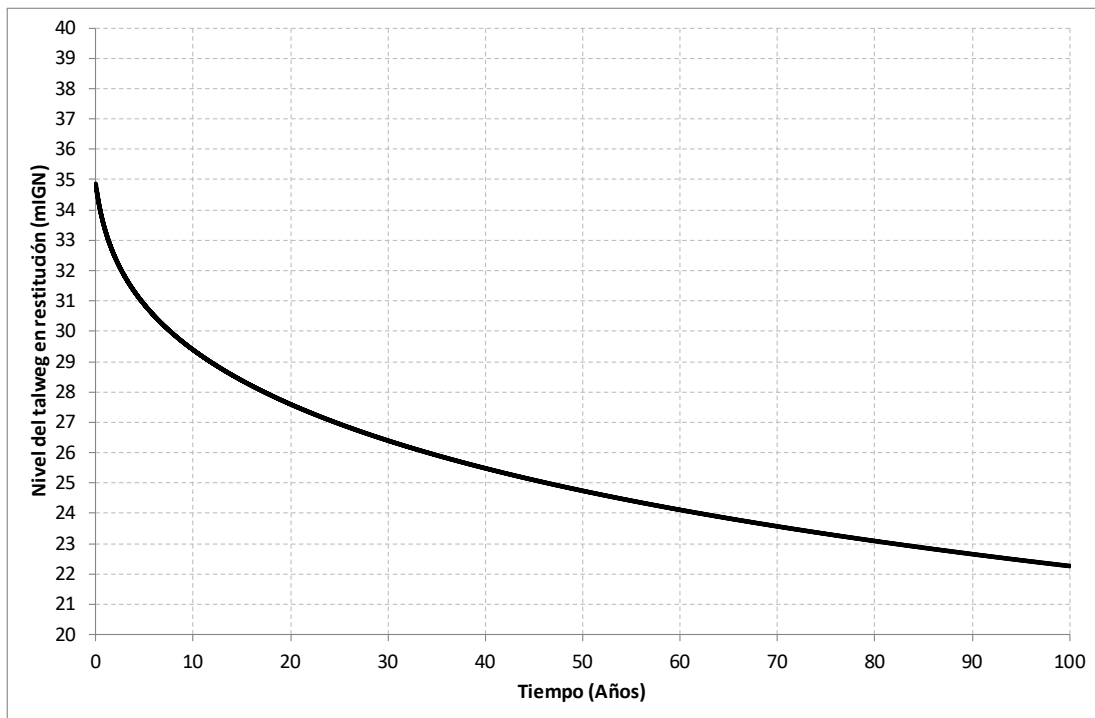


Figura 4.19. Evolución temporal del nivel del talweg en la restitución para la Alternativa 2.

4.4 Acarreo de fondo en embalse

Los procesos de transporte de sedimento en un tramo fluvial están motorizados primordialmente por las tensiones de corte producidas por el escurrimiento. Por lo tanto, estudiar las tensiones de corte es una manera de evaluar cómo se modificarían dichos procesos ante cambios en las condiciones del tramo.

Con el objetivo de evaluar cómo se modificaría el transporte en el tramo entre Yacyretá e Itatí-Itacorá se calcularon con el modelo las tensiones de corte totales para los escenarios sin proyecto, y con el proyecto de Itatí-Itacorá a cota 59 m y 61 m, tomándose como representativa la alternativa de cierre 1A. Se consideraron los escenarios de caudal constante representativo del medio, de 14.735 m³/s, y representativo de crecidas extraordinarias, de 45.000 m³/s.

La **Figura 4.20** y la **Figura 4.21** presentan el perfil longitudinal de tensión de corte para el caudal medio y el de crecida, respectivamente. Se observa que por el proyecto disminuyen significativamente las tensiones de corte en el tramo entre ambos cierres. La reducción es drástica en el caso del caudal medio, ya que aguas abajo de Ituzaingó las tensiones de corte disminuyen desde 2/8 Pa hasta 0,3/1,4 Pa con el embalse a cota 59 m, y hasta 0,2/0,9 Pa con el embalse a cota 61 m, lo que significa reducciones de entre aproximadamente 85% y 90%. Para el caudal de crecida la reducción es mucho menor: desde 2/8 Pa hasta 1,8/6,0 Pa (reducción de entre 10% y 25%) y 1,5/4,7 Pa (reducción de entre 25% y 40%), respectivamente.

De la disminución de las tensiones de corte para la situación con proyecto se infiere que los procesos de acarreo serían mucho menos significativos en el tramo entre Yacyretá e Itatí-Itacorá. No obstante, debe tenerse en cuenta que, de acuerdo a lo analizado en el Tercer Informe Parcial, probablemente el lecho del río Paraná en ese tramo ya ha alcanzado un

estrato consolidado que impide su erosión bajo la acción de los esfuerzos de corte asociados a las condiciones hidrodinámicas del río, de modo que el acarreo incluso puede ser muy poco significativo en las condiciones actuales.

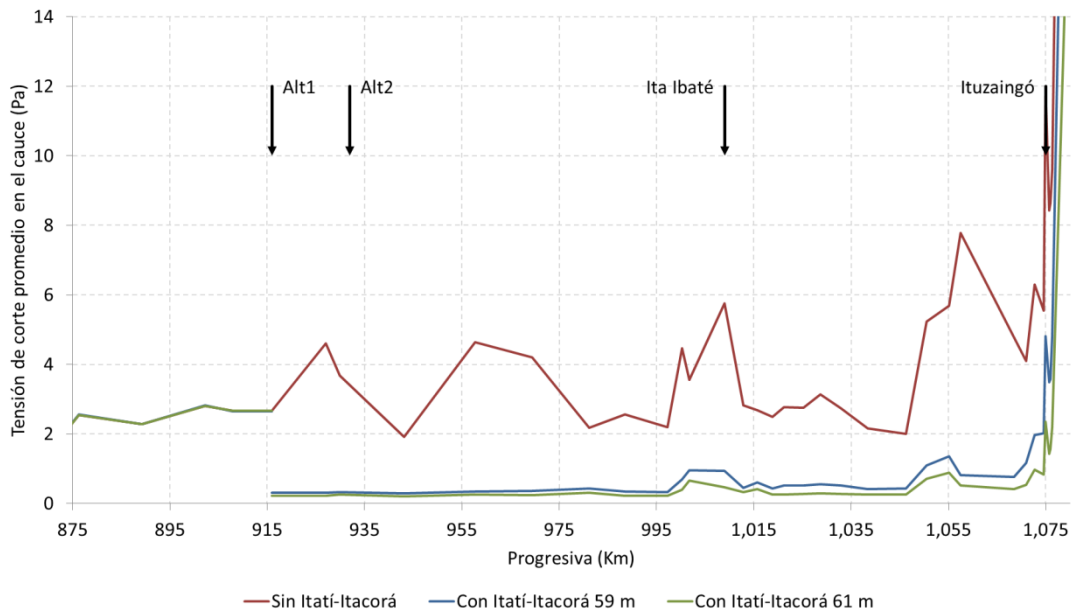


Figura 4.20. Perfil de tensión de corte para un caudal de 14.735 m³/s en distintos escenarios de proyecto.

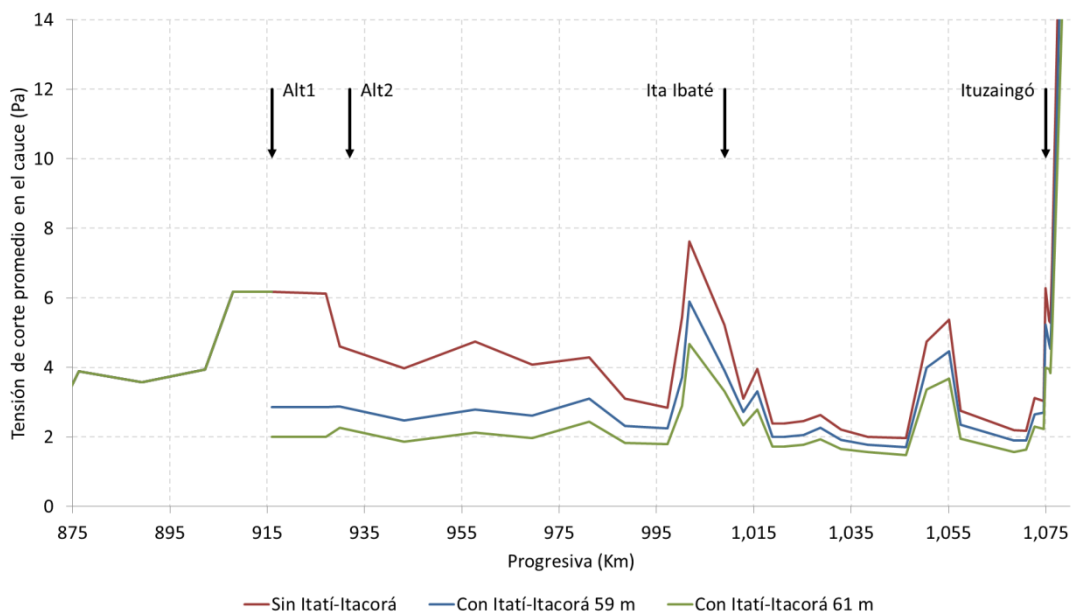


Figura 4.21. Perfil de tensión de corte para un caudal de 45.000 m³/s en distintos escenarios de proyecto.

4.5 Acción erosiva sobre márgenes

Para estudiar cómo afectaría el empuntamiento de las centrales a la potencial erosión sobre las márgenes, se determinaron con el modelo las tensiones de corte cuando se opera con la política esquematizada en la **Figura 3.42**. Se consideró un caudal medio diario de 10.500 m³/s, y se modelaron las condiciones sin proyecto, y con proyecto a cota 59 m y 61 m con ambas centrales empuntadas. Se analizó como representativa la alternativa de cierre 1A, con 31 (de 34) máquinas en funcionamiento.

Dado que no es posible obtener mediante un análisis unidimensional una estimación precisa de la tensión de corte en la propia margen, se utilizará como indicador la tensión de corte media en la sección transversal completa. En La **Figura 4.22** se presentan las envolventes de esta tensión de corte para las tres condiciones. Se observa que en el tramo aguas arriba de Itatí-Itacorá la presencia del embalse disminuye las tensiones de corte de manera significativa, independientemente de su empuntamiento.

Aguas abajo del cierre las tensiones de corte máximas aumentan por efecto del empuntamiento de la nueva central. Se observa que el valor pico de estas tensiones máximas en ese tramo es de aproximadamente 3,6 Pa, que es del mismo orden que el obtenido para condiciones de crecida extraordinaria en ese tramo (**Figura 4.21**). Por un lado, esto significa que el empuntamiento no produciría sobre las márgenes tensiones de corte mayores en magnitud que las ya experimentadas durante esos eventos extraordinarios. Pero, por el otro lado, indica que esas tensiones de corte incrementadas actuarían con una frecuencia mucho mayor (diaria), lo cual puede incrementar el peligro de erosión.

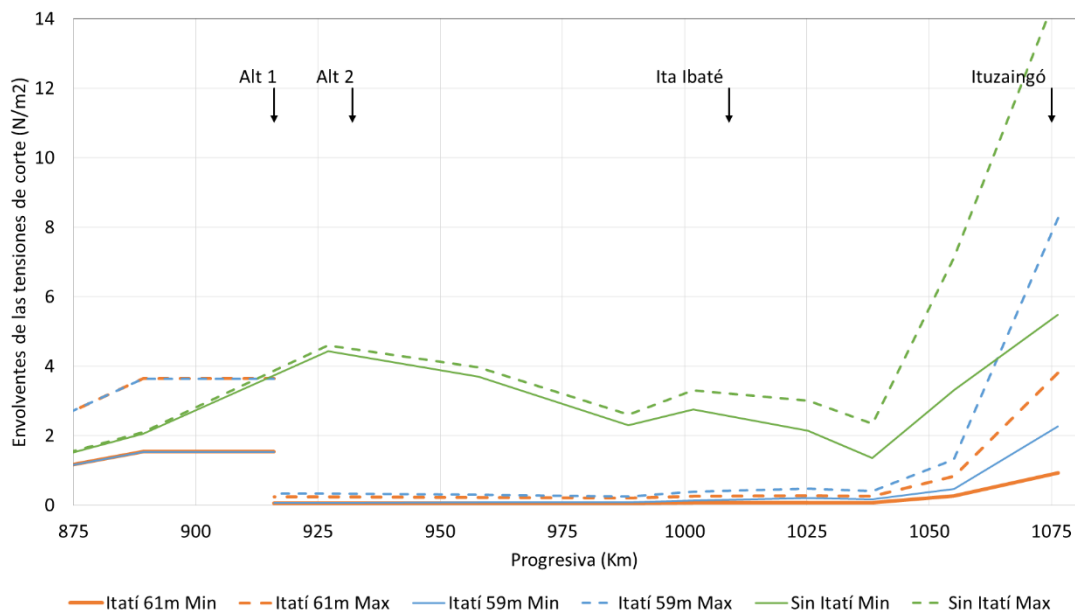


Figura 4.22. Envolventes de la tensión de corte en distintas secciones producidas por el empuntado de Yacyretá e Itatí-Itacorá para un caudal medio diario de 10.500 m³/s.

5 ACCIÓN DEL OLAJE

5.1 Consideraciones generales

El cierre Itatí-Itacorá generará un embalse sobre el cual se desarrollarán olas por la acción del viento. Estas impactarán sobre las márgenes, ejerciendo una acción potencialmente erosiva que es necesario cuantificar. Para lograr este objetivo es necesario, en primer lugar, modelar la generación y propagación de olas, y, en segundo lugar, calcular tasas potenciales de erosión de las márgenes en función de las características de las olas incidentes.

En cuanto a los antecedentes afines a este tipo de estudios, se destaca que la metodología utilizada para la modelación de oleaje viene siendo aplicada por el LH del INA en el desarrollo de las tareas vinculadas a la medición y el pronóstico de olas en el Embalse de Yacyretá, actividad llevada a cabo de manera continua desde mediados de 2002.

5.2 Metodología de modelación del oleaje

Para representar la generación de olas dentro del embalse de Itatí por acción del viento se utilizó el modelo matemático SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*), desarrollado en Delft University of Technology (Booij et al., 1999).

SWAN es una herramienta ampliamente utilizada en el campo de la ingeniería de costas, tanto para la modelación del oleaje en áreas marítimas, como en el caso de lagos y estuarios.

Los siguientes procesos de generación y disipación de olas son representados por SWAN:

- Generación de olas por acción del viento
- Propagación a través del espacio físico.
- Refracción debida a la variación de la profundidad y corriente.
- Bajío debido a la variación de la profundidad y la corriente.
- Propagación de ola con corrientes opuestas.
- Disipación por descrestamiento (*whitecapping*).
- Disipación por rotura de ola inducida por la profundidad
- Disipación inducida por la fricción del fondo

- Interacción no lineal entre frecuencias del espectro en aguas profundas y someras.

Mediante la aplicación de SWAN se pueden estimar los parámetros de oleaje en regiones costeras basándose en una representación espectral de la ecuación de balance de la densidad de acción de olas $N(\sigma, \theta)$, donde todos los procesos físicos están modelados explícitamente.

La densidad de acción de ola se define como $N = E/\sigma$, donde E es la densidad energía (energía cinética más potencial por unidad de superficie), σ la frecuencia relativa y θ la dirección de propagación.

La ecuación de balance de la acción se escribe como:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial (C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial (C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial (C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma}$$

El primer término a la izquierda expresa el cambio local en el tiempo de la densidad de acción de ola, el segundo y tercero representan la propagación de la densidad de acción en el espacio con velocidades C_x y C_y . El cuarto describe los cambios de la frecuencia relativa debido a cambios en profundidad o a corrientes. El quinto término es el cambio debido a refracción.

El término S del miembro derecho de la ecuación representa las fuentes y sumideros de energía y puede ser descripto como la suma de varios y diferentes procesos físicos:

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl}$$

donde:

- S_{in} es la energía transferida por el viento,
- S_{ds} es la disipación de energía
- S_{nl} representa la transferencia de energía entre olas por efectos no lineales.

El término de disipación S_{ds} consta a su vez de tres componentes principales:

- Las “crestas blancas” o *whitecapping*, pequeñas rompientes sobre las crestas de las olas que ocurren por un exceso de entrada de energía.
- La fricción con el fondo.
- La rompiente inducida por la disminución de la profundidad.

Las interacciones no lineales ola-ola son las responsables del intercambio de energía entre componentes de diferentes frecuencias del mismo espectro, y son las responsables de redistribuir la energía entre dichas componentes. En aguas profundas la transferencia de la energía se realiza desde el pico espectral ya sea a las frecuencias más altas o más bajas (obligando al pico espectral a desplazarse en uno u otro sentido), dependiendo ello de si el oleaje está siendo disipado o no por las crestas blancas. En aguas someras la interacción entre diferentes frecuencias transfiere energía de frecuencias bajas a altas, obligando así al pico espectral a disminuir su período.

La ecuación de balance es una ecuación diferencial de primer orden, en la que las cinco variables independientes son el tiempo t , las coordenadas espaciales x, y , la frecuencia relativa σ y la dirección de propagación θ . La variable dependiente a resolver es la densidad de acción de ola N .

La integración se implementa en un esquema en diferencias finitas, con paso de tiempo Δt (el mismo para los términos de propagación y el término fuente). El espacio geográfico se discretiza mediante una grilla de paso Δx y Δy . El espectro (direccional) para el oleaje se representa con una resolución $\Delta\theta$ en la dirección y una resolución constante $\Delta\sigma/\sigma$ en frecuencia.

5.3 Dominio de cálculo

El modelo fue implementado sobre un dominio de cálculo que representa la totalidad del área sobre la cual se desarrollará el cuerpo de agua que constituye el embalse. El mismo consiste en una discretización espacial del mapa digital del terreno construido con una resolución de 200 m (**Figura 5.1**). Los límites del espejo de agua se tomaron en coincidencia con la curva de nivel de 61 metros sobre el nivel del mar (Cota IGN). El sistema de coordenadas planas adoptado en la conformación de las grillas es UTM Zona 21 Sur. Se cuenta con un total de 200 x 758 nodos, abarcando un área de 1891.9 km².

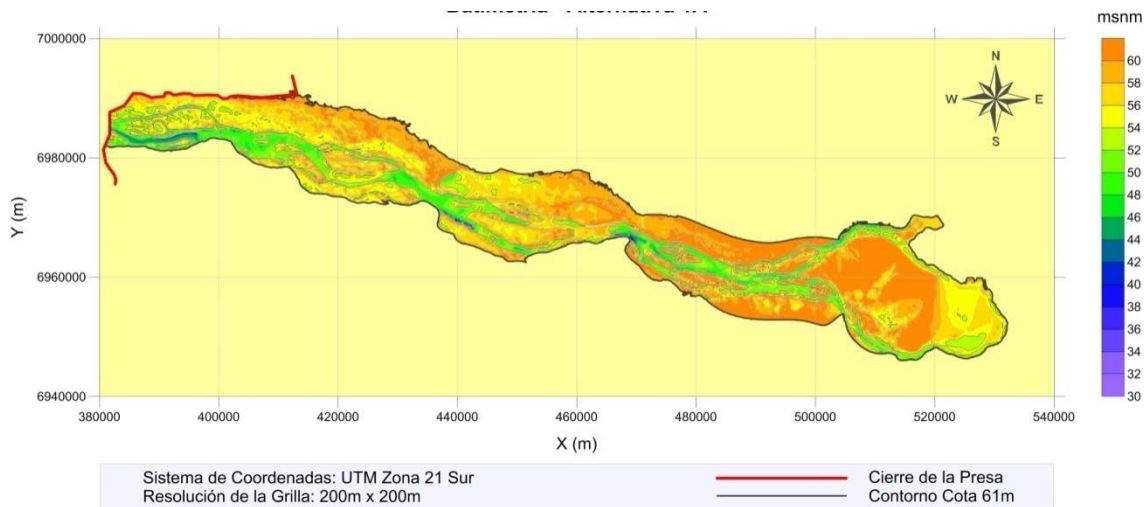


Figura 5.1. Dominio de cálculo para la evaluación del oleaje en el embalse (Alternativa 1A).

La información topográfica empleada consistió principalmente en datos provenientes de un modelo digital de elevación de la Misión Topográfica Shuttle Radar (acrónimo en inglés SRTM, de *Shuttle Radar Topography Mission*), el cual es un proyecto internacional en el que intervienen la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial, NGA, y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, NASA (<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>).

Adicionalmente, se empleó información proveniente de relevamientos de campo (diferentes secciones a lo largo de la traza del Río Paraná), las que se utilizaron como base para el trazado de diversas curvas de nivel batimétricas.

5.4 Escenarios de cálculo

Siguiendo el propósito de evaluar la generación del oleaje frente a la ocurrencia de eventos significativos en cuanto a la intensidad del viento, se procedió a la modelación de un conjunto de escenarios seleccionados a partir del análisis estadístico de vientos disponibles en la región.

Por consiguiente, los escenarios de cálculo utilizados en las simulaciones de SWAN consistieron en un conjunto de valores de intensidad del viento asociados a diferentes períodos de retorno, considerando una rosa de 16 direcciones. Estos datos, presentados en la **Tabla 5.1**, surgieron de un análisis de valores extremos desarrollado a partir del registro de intensidades medias horarias en la ciudad de Posadas. Los datos de base fueron suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y abarcan un período con una extensión temporal de 25 años (1991-2015) (INA, 2015b).

Tabla 5.1. Escenarios de viento para la generación del oleaje

TR (años)	Intensidad del viento W (m/s) por dirección															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	9.4	9.2	9.8	9.8	9.9	7.3	9.3	9.0	12.2	12.3	13.7	10.2	10.8	8.4	8.9	9.4
5	10.7	10.7	11.3	11.7	11.7	8.2	10.7	10.8	15.0	14.1	15.8	12.4	13.6	10.1	10.6	11.3
10	11.6	11.6	12.4	12.9	12.9	8.7	11.5	12.0	16.8	15.2	16.8	13.9	15.4	11.2	11.7	12.5
20	12.4	12.6	13.4	14.1	14.1	9.3	12.3	13.1	18.6	16.2	17.4	15.3	17.1	12.2	12.8	13.7
50	13.5	13.8	14.7	15.6	15.6	10.0	13.4	14.6	20.9	17.6	18.0	17.1	19.4	13.6	14.2	15.2
100	14.4	14.7	15.7	16.8	16.7	10.5	14.2	15.7	22.6	18.6	18.3	18.5	21.1	14.6	15.3	16.4

En concordancia con la **Tabla 5.1**, se realizaron un total de 96 simulaciones numéricas mediante la aplicación de SWAN, considerando en cada caso un valor de intensidad y dirección de viento distribuido uniformemente en toda el área modelada.

5.5 Predicción de olas

Como resultado de la modelación se obtuvo la distribución del campo de alturas significativas (H_s) y períodos de pico (T_p) del oleaje dentro del embalse para cada una de las simulaciones realizadas. La **Figura 5.2**, la **Figura 5.3** y la **Figura 5.4** muestran, a modo de ejemplo, los valores de H_s correspondientes a tres simulaciones realizadas con una misma intensidad de viento pero con diferente dirección de incidencia para la Alternativa A1.

La escala de colores permite interpretar en cada caso las diferencias en las alturas de ola para cada figura. Los valores de oleaje más altos estimados para el viento de 60 km/h se encuentran en el orden de $H_s = 1,25$ m, ubicándose en sectores para los cuales, de acuerdo con la alineación del viento, se alcanzan los mayores valores de fetch (distancia de generación).

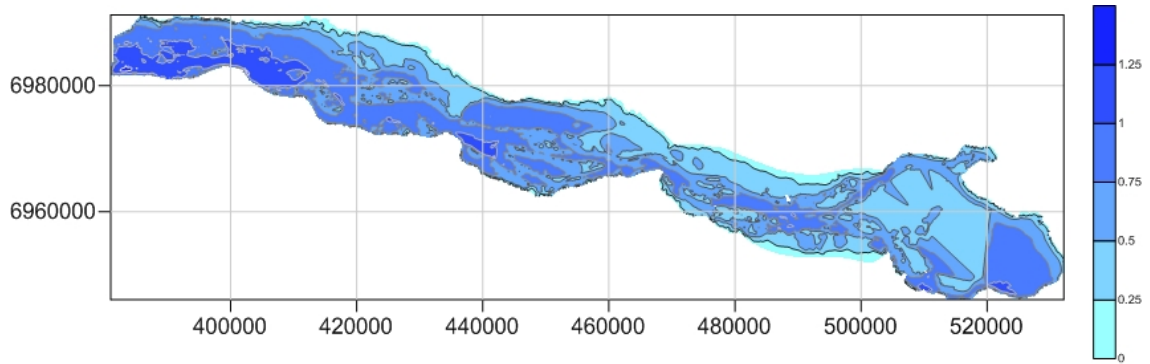


Figura 5.2. Resultado de la modelación. Viento NE, $W=16.7$ m/s (60 km/h). Alternativa A1.

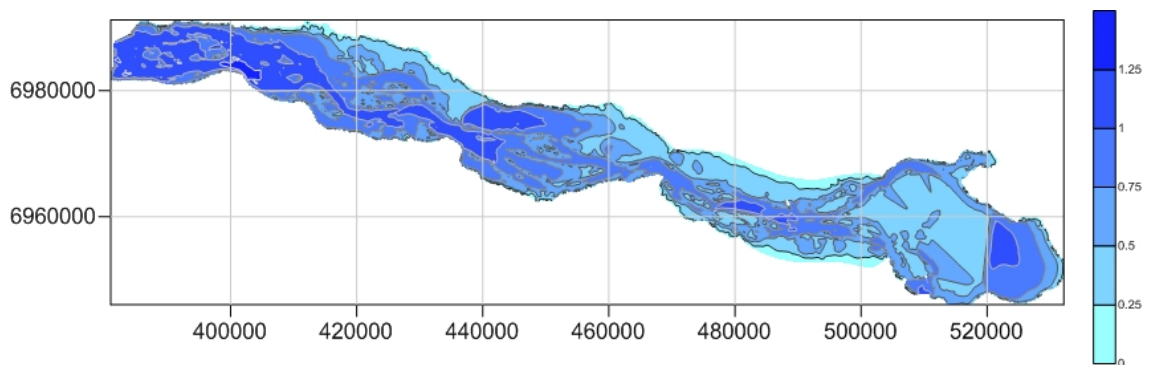


Figura 5.3. Resultado de la modelación. Viento E, $W=16.7$ m/s (60 km/h). Alternativa A1.

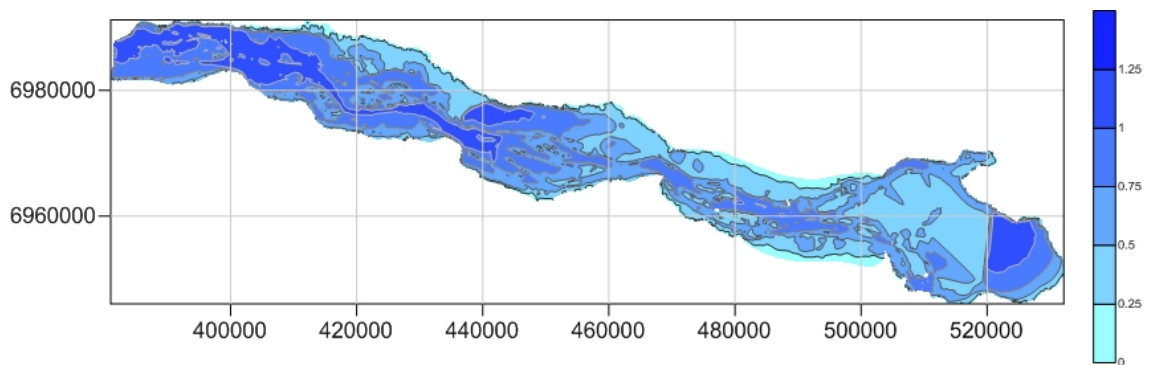


Figura 5.4. Resultado de la modelación. Viento SE, $W=16.7$ m/s (60 km/h). Alternativa A1.

Por otra parte, las figuras muestran que los resultados se encuentran fuertemente condicionados por el contraste irregular de profundidades que presenta el área modelada. En efecto, las diferencias notables entre los sectores coincidentes con cauce natural del río (mayores profundidades), donde pueden encontrarse las olas de mayor altura, y zonas inundadas por la presencia del embalse (menores profundidades), donde tienen preponderancia los mecanismos de rotura y disipación del oleaje.

Estas observaciones evidencian claramente los condicionantes que impone la batimetría sobre la propagación del oleaje, al tiempo que señalan la importancia que puede tener sobre este aspecto la mejora en la caracterización del MDE para el área del embalse en una etapa más avanzada de los estudios.

La **Figura 5.5** a la **Figura 5.8** muestran las configuraciones establecidas para cada alternativa evaluada, indicando los tramos de costa correspondiente al cierre del embalse y a las márgenes derecha e izquierda, respectivamente. A los efectos de favorecer el análisis referido a la incidencia del oleaje sobre las eventuales obras de defensa, cada una de las alternativas de cierre fue subdividida en dos partes: Tramo Norte-Sur y Tramo Este-Oeste.

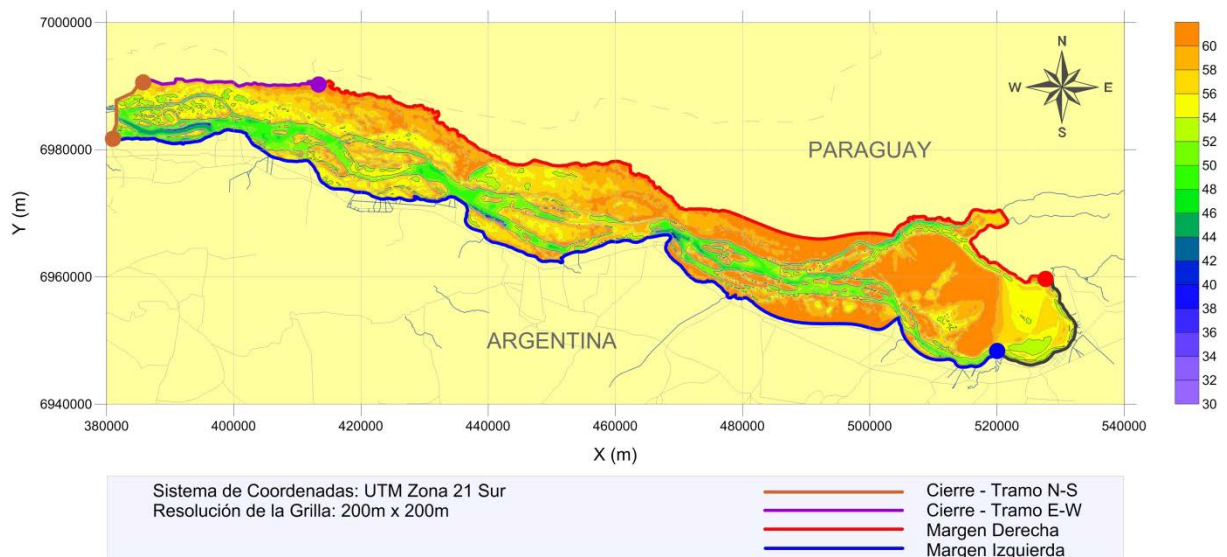


Figura 5.5. Identificación de tramos para la evaluación de los resultados en Alternativa 1A

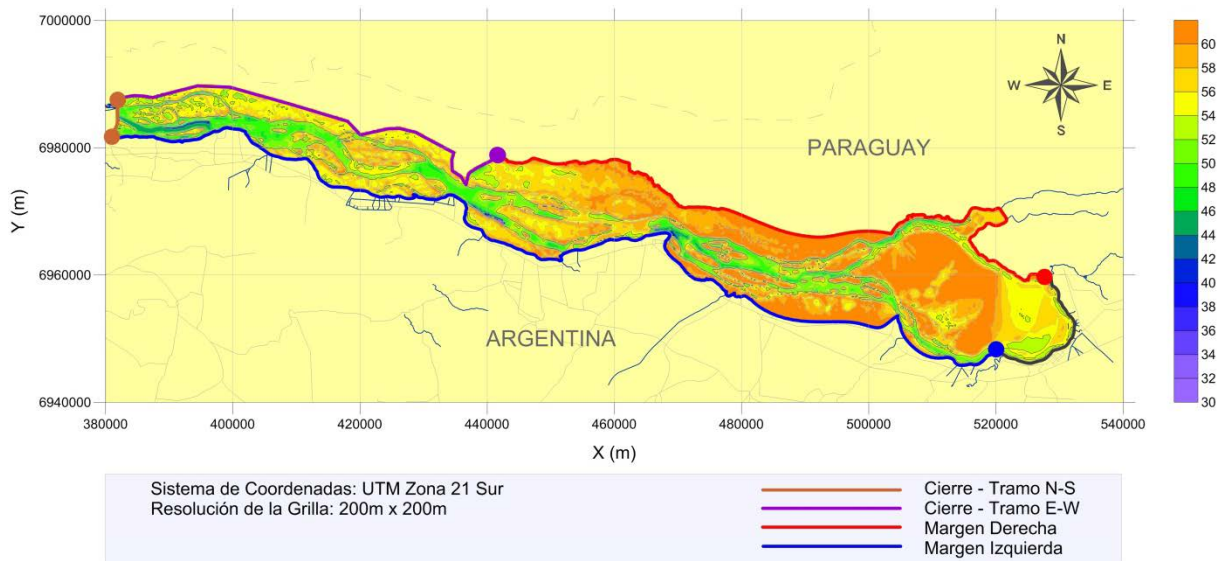


Figura 5.6. Identificación de tramos para la evaluación de los resultados en Alternativa 1B

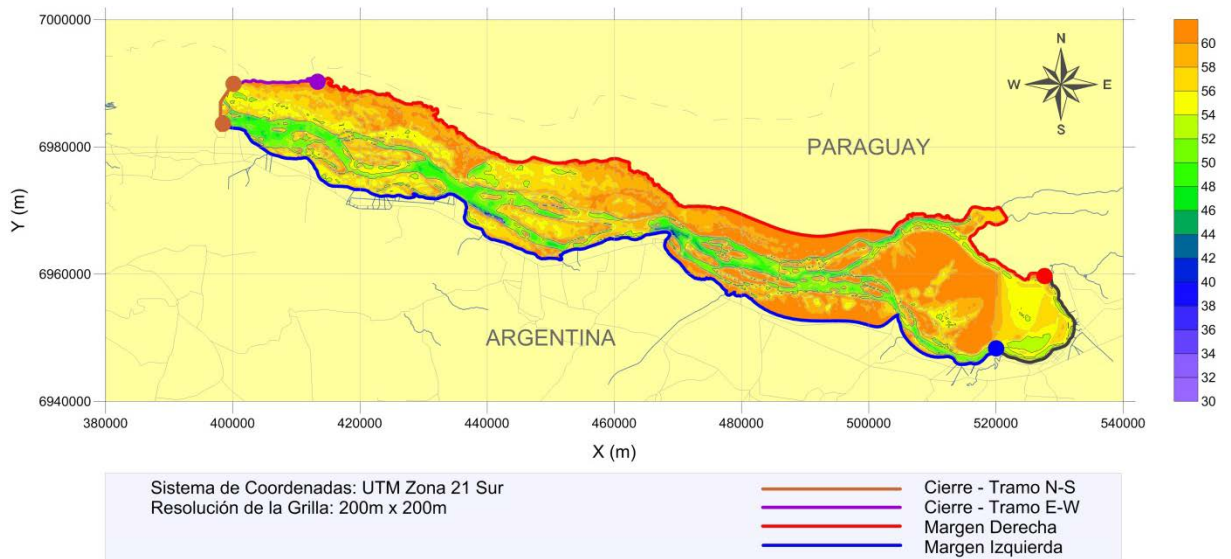


Figura 5.7. Identificación de tramos para la evaluación de los resultados en Alternativa 2A

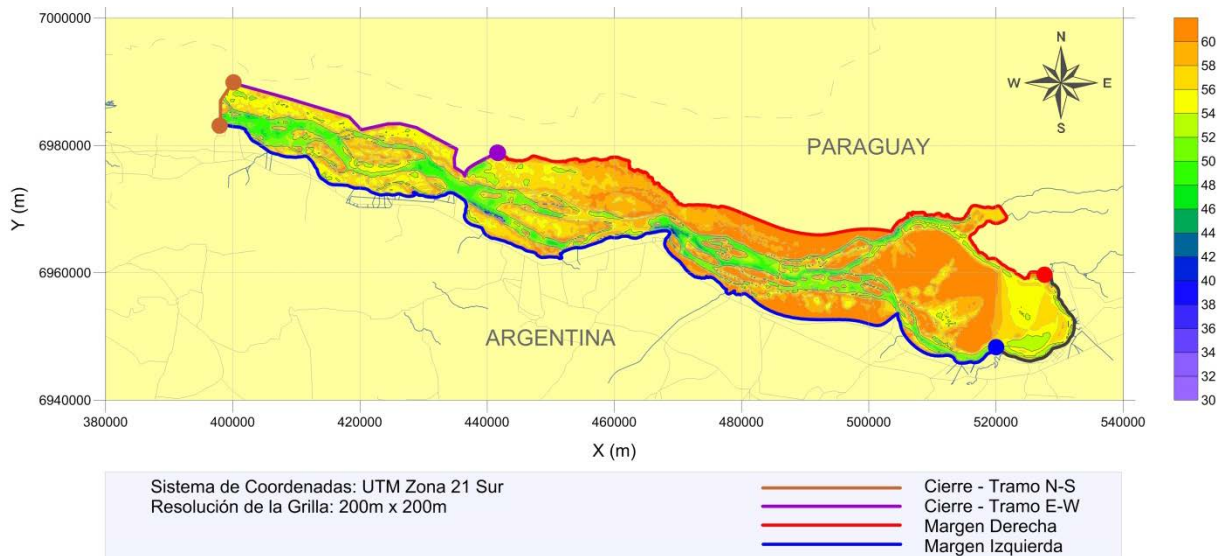


Figura 5.8. Identificación de tramos para la evaluación de los resultados en Alternativa 2B

Se efectuaron los cálculos para los distintos escenarios, descritos en la sección 5.4. Los resultados de la modelación son presentados a continuación en formato de tablas en las que se indican para cada tramo del cierre (Tramo Norte-Sur y Tramo Este Oeste) los valores máximos de altura de ola $H_{1/10}$ y su respectivo período de pico T_p .

5.5.1 Resultados para Alternativa 1A

La **Tabla 5.2** a la **Tabla 5.5** presentan los resultados correspondientes a la alternativa de cierre 1A.

Tabla 5.2. Alturas de ola $H_{1/10}$ estimadas para el Tramo Norte-Sur de la Alternativa 1A

1A	Cierre - Tramo Norte-Sur															
	Altura de Ola Máxima $H_{1/10}$ (m)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.47	0.59	0.75	0.83	0.88	0.58	0.77	0.68	0.85	0.74	0.77	0.51	0.46	0.30	0.31	0.39
5	0.54	0.70	0.89	1.03	1.07	0.67	0.92	0.85	1.07	0.84	0.90	0.64	0.59	0.36	0.37	0.47
10	0.59	0.77	0.99	1.16	1.21	0.72	1.01	0.97	1.21	0.91	0.96	0.73	0.67	0.39	0.41	0.53
20	0.64	0.84	1.07	1.28	1.34	0.79	1.09	1.08	1.33	0.98	0.97	0.81	0.75	0.43	0.45	0.58
50	0.70	0.92	1.20	1.44	1.49	0.87	1.20	1.21	1.47	1.07	1.03	0.91	0.86	0.47	0.50	0.65
100	0.76	0.99	1.29	1.55	1.60	0.92	1.27	1.30	1.59	1.13	1.03	0.98	0.93	0.51	0.54	0.71

Tabla 5.3. Períodos de pico T_p estimados para el Tramo Norte-Sur de la Alternativa 1A

1A	Cierre - Tramo Norte-Sur															
	Período de Pico T_p (s)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	2.19	2.88	3.16	3.16	3.16	2.88	3.16	2.88	2.88	2.63	2.88	2.40	2.19	1.82	1.82	1.99
5	2.40	3.16	3.47	3.47	3.47	2.88	3.16	3.16	3.16	2.88	2.88	2.63	2.63	1.99	1.99	2.19
10	2.40	3.16	3.47	3.47	3.80	3.16	3.47	3.16	3.47	2.88	3.16	2.63	2.63	2.19	1.99	2.40
20	2.63	3.16	3.47	3.80	3.80	3.16	3.47	3.47	3.47	3.16	3.16	2.88	2.88	2.19	2.19	2.40
50	2.63	3.16	3.80	3.80	3.80	3.16	3.47	3.47	3.80	3.16	3.16	3.16	2.88	2.19	2.19	2.63
100	2.88	3.47	3.80	3.80	4.17	3.47	3.80	3.47	3.80	3.16	3.16	3.16	3.16	2.40	2.40	2.63

Tabla 5.4. Alturas de ola $H_{1/10}$ estimadas para el Tramo Este-Oeste de la Alternativa 1A

1A	Cierre - Tramo Este-Oeste															
	Altura de Ola Máxima $H_{1/10}$ (m)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.30	0.37	0.51	0.63	0.75	0.56	0.74	0.66	0.90	0.95	1.12	0.83	0.82	0.53	0.47	0.39
5	0.34	0.44	0.60	0.77	0.90	0.65	0.87	0.82	1.11	1.09	1.30	1.02	1.04	0.66	0.57	0.47
10	0.37	0.48	0.66	0.85	1.00	0.70	0.95	0.92	1.24	1.18	1.38	1.14	1.17	0.74	0.62	0.52
20	0.39	0.53	0.72	0.94	1.09	0.75	1.01	1.01	1.36	1.26	1.43	1.25	1.29	0.80	0.69	0.57
50	0.42	0.58	0.80	1.04	1.21	0.82	1.11	1.12	1.49	1.36	1.48	1.39	1.45	0.90	0.76	0.63
100	0.45	0.62	0.86	1.12	1.29	0.86	1.17	1.20	1.59	1.44	1.50	1.50	1.56	0.96	0.82	0.68

Tabla 5.5. Períodos de pico T_p estimados para el Tramo Este-Oeste de la Alternativa 1A

1A	Cierre - Tramo Este-Oeste															
	Período de Pico T_p (s)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	1.51	1.82	2.88	3.16	3.16	2.88	3.16	2.88	2.88	3.16	3.47	3.16	3.16	2.88	2.88	2.88
5	1.66	2.88	3.16	3.16	3.47	2.88	3.16	3.16	3.16	3.47	3.80	3.47	3.47	3.16	2.88	2.88
10	1.82	1.99	3.16	3.47	3.47	3.16	3.47	3.16	3.47	3.47	3.80	3.80	3.80	3.16	3.16	3.16
20	1.82	1.99	3.16	3.47	3.80	3.16	3.47	3.47	3.47	3.80	3.80	3.80	3.80	3.47	3.16	3.16
50	1.82	2.19	3.47	3.80	3.80	3.16	3.47	3.47	3.80	3.80	4.17	4.17	4.17	3.47	3.47	3.16
100	1.99	2.19	3.47	3.80	3.80	3.47	3.80	3.47	3.80	3.80	4.17	4.17	4.17	3.47	3.47	3.16

5.5.2 Resultados para Alternativa 1B

La **Tabla 5.6** a la **Tabla 5.9** presentan los resultados correspondientes a la alternativa de cierre 1B.

Tabla 5.6. Alturas de ola $H_{1/10}$ estimadas para el Tramo Norte-Sur de la Alternativa 1B

1B	Cierre - Tramo Norte-Sur															
	Altura de Ola Máxima $H_{1/10}$ (m)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.48	0.63	0.83	0.91	0.90	0.56	0.72	0.61	0.75	0.59	0.53	0.29	0.26	0.20	0.28	0.38
5	0.56	0.77	1.01	1.15	1.12	0.66	0.87	0.78	0.96	0.70	0.63	0.37	0.34	0.25	0.35	0.46
10	0.62	0.86	1.13	1.28	1.25	0.72	0.95	0.88	1.09	0.76	0.67	0.43	0.40	0.29	0.39	0.52
20	0.68	0.96	1.25	1.42	1.39	0.78	1.03	0.99	1.22	0.82	0.70	0.48	0.45	0.32	0.44	0.57
50	0.75	1.07	1.39	1.58	1.55	0.86	1.13	1.12	1.38	0.89	0.72	0.55	0.53	0.37	0.49	0.64
100	0.81	1.16	1.49	1.71	1.66	0.91	1.21	1.21	1.49	0.95	0.73	0.61	0.58	0.40	0.54	0.70

Tabla 5.7. Períodos de pico T_p estimados para el Tramo Norte-Sur de la Alternativa 1B

1B	Cierre - Tramo Norte-Sur															
	Período de Pico T_p (s)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	2.40	2.88	3.16	3.47	3.47	2.88	3.16	2.88	2.88	2.63	2.63	1.82	1.51	1.26	1.99	2.19
5	2.63	3.16	3.47	3.80	3.80	3.16	3.16	3.16	3.16	2.88	2.88	1.99	1.82	1.38	2.19	2.40
10	2.63	3.16	3.80	3.80	3.80	3.16	3.47	3.16	3.47	2.88	2.88	2.19	1.82	1.51	2.19	2.40
20	2.88	3.47	3.80	3.80	3.80	3.16	3.47	3.16	3.47	3.16	2.88	2.19	1.99	1.51	2.40	2.63
50	2.88	3.47	3.80	4.17	4.17	3.47	3.47	3.47	3.47	3.16	2.88	2.40	2.19	1.66	2.40	2.63
100	3.16	3.80	4.17	4.17	4.17	3.47	3.80	3.47	3.80	3.16	3.16	2.40	2.19	1.99	2.63	2.63

Tabla 5.8. Alturas de ola $H_{1/10}$ estimadas para el Tramo Este-Oeste de la Alternativa 1B

1B	Cierre - Tramo Este-Oeste															
	Altura de Ola Máxima $H_{1/10}$ (m)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.46	0.50	0.62	0.73	0.83	0.58	0.79	0.71	0.95	1.02	1.22	0.89	0.93	0.64	0.59	0.51
5	0.53	0.59	0.73	0.92	1.01	0.67	0.93	0.89	1.21	1.20	1.42	1.11	1.21	0.80	0.72	0.63
10	0.57	0.64	0.81	1.03	1.13	0.73	1.01	1.01	1.36	1.30	1.51	1.26	1.36	0.90	0.81	0.71
20	0.61	0.70	0.90	1.14	1.25	0.80	1.10	1.11	1.51	1.38	1.56	1.40	1.51	0.98	0.89	0.78
50	0.67	0.77	1.00	1.28	1.40	0.87	1.19	1.24	1.68	1.49	1.62	1.57	1.69	1.12	0.99	0.88
100	0.72	0.82	1.08	1.39	1.51	0.93	1.27	1.33	1.80	1.56	1.64	1.70	1.68	1.20	1.07	0.96

Tabla 5.9. Períodos de pico T_p estimados para el Tramo Este-Oeste de la Alternativa 1B

1B	Cierre - Tramo Este-Oeste															
	Período de Pico T_p (s)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	2.19	2.40	2.88	3.16	3.16	2.88	3.16	2.88	3.16	3.47	3.47	3.16	3.47	3.16	3.16	2.63
5	2.40	2.63	3.16	3.47	3.47	2.88	3.47	3.16	3.47	3.47	3.80	3.47	3.80	3.47	3.16	2.88
10	2.40	2.88	3.16	3.47	3.80	3.16	3.47	3.47	3.47	3.80	4.17	3.80	4.17	3.47	3.47	2.88
20	2.63	2.88	3.47	3.80	3.80	3.16	3.47	3.47	3.80	3.80	4.17	3.80	4.17	3.80	3.47	3.16
50	2.63	2.88	3.47	3.80	4.17	3.16	3.80	3.47	3.80	3.80	4.17	4.17	4.17	3.80	3.80	3.16
100	2.88	3.16	3.47	4.17	4.17	3.47	3.80	3.80	3.80	4.17	4.17	4.17	4.17	3.80	3.80	3.16

5.5.3 Resultados para Alternativa 2A

La **Tabla 5.10** a la **Tabla 5.13** presentan los resultados correspondientes a la alternativa de cierre 2A.

Tabla 5.10. Alturas de ola $H_{1/10}$ estimadas para el Tramo Norte-Sur de la Alternativa 2A

2A	Cierre - Tramo Norte-Sur															
	Altura de Ola Máxima $H_{1/10}$ (m)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.51	0.61	0.74	0.82	0.87	0.60	0.80	0.68	0.83	0.68	0.70	0.41	0.35	0.23	0.31	0.41
5	0.59	0.74	0.89	1.02	1.06	0.70	0.95	0.86	1.06	0.82	0.83	0.53	0.47	0.29	0.38	0.52
10	0.65	0.81	1.00	1.13	1.18	0.76	1.03	0.97	1.21	0.89	0.89	0.61	0.55	0.33	0.43	0.58
20	0.71	0.90	1.10	1.24	1.29	0.82	1.11	1.08	1.35	0.96	0.93	0.69	0.63	0.37	0.48	0.65
50	0.78	1.00	1.23	1.38	1.44	0.90	1.22	1.22	1.50	1.06	0.97	0.79	0.73	0.42	0.55	0.73
100	0.84	1.08	1.33	1.49	1.53	0.95	1.30	1.33	1.61	1.11	0.99	0.87	0.81	0.46	0.60	0.80

Tabla 5.11. Períodos de pico T_p estimados para el Tramo Norte-Sur de la Alternativa 2A

2A	Cierre - Tramo Norte-Sur															
	Período de Pico T_p (s)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	2.40	2.88	3.16	3.16	3.47	2.88	3.16	2.88	3.16	2.63	2.63	2.19	1.99	1.51	1.99	2.19
5	2.63	3.16	3.47	3.47	3.80	3.16	3.47	3.16	3.47	2.88	2.88	2.40	2.19	1.82	2.19	2.40
10	2.63	3.16	3.47	3.80	3.80	3.16	3.47	3.47	3.47	2.88	2.88	2.63	2.40	1.99	2.19	2.40
20	2.63	3.16	3.47	3.80	3.80	3.16	3.47	3.47	3.47	2.88	2.88	2.63	2.63	1.99	2.40	2.63
50	2.88	3.47	3.80	4.17	4.17	3.47	3.80	3.80	3.80	3.16	3.16	2.88	2.63	1.99	2.40	2.63
100	2.88	3.47	3.80	4.17	4.17	3.47	3.80	3.80	3.80	3.16	3.16	2.88	2.88	2.19	2.63	2.88

Tabla 5.12. Alturas de ola $H_{1/10}$ estimadas para el Tramo Este-Oeste de la Alternativa 2A

2A	Cierre - Tramo Este-Oeste															
	Altura de Ola Máxima $H_{1/10}$ (m)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.21	0.29	0.43	0.55	0.68	0.53	0.72	0.64	0.81	0.77	0.84	0.54	0.51	0.31	0.26	0.22
5	0.25	0.34	0.51	0.67	0.81	0.61	0.85	0.80	1.02	0.90	0.97	0.69	0.64	0.39	0.32	0.27
10	0.28	0.38	0.55	0.74	0.90	0.65	0.92	0.91	1.15	0.97	1.04	0.79	0.74	0.43	0.36	0.31
20	0.30	0.41	0.60	0.81	0.99	0.71	0.99	1.00	1.28	1.04	1.07	0.89	0.84	0.48	0.39	0.35
50	0.34	0.45	0.66	0.90	1.09	0.77	1.08	1.12	1.41	1.13	1.11	1.00	0.97	0.52	0.43	0.40
100	0.36	0.49	0.70	0.97	1.17	0.81	1.14	1.21	1.50	1.17	1.12	1.09	1.06	0.56	0.47	0.44

Tabla 5.13. Períodos de pico T_p estimados para el Tramo Este-Oeste de la Alternativa 2A

2A	Cierre - Tramo Este-Oeste															
	Período de Pico T_p (s)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	1.38	1.66	2.88	3.16	3.16	2.88	3.16	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88	2.88	2.40	1.82	1.38
5	1.51	1.66	3.16	3.16	3.47	2.88	3.47	3.16	3.16	3.16	3.16	2.63	2.63	2.63	1.82	1.51
10	1.51	1.82	3.16	3.47	3.47	3.16	3.47	3.16	3.47	3.16	3.16	2.88	2.88	2.63	1.99	1.66
20	1.66	1.82	3.16	3.47	3.80	3.16	3.47	3.47	3.47	3.16	3.47	2.88	2.88	2.88	1.82	1.66
50	1.66	1.82	3.47	3.80	3.80	3.16	3.80	3.47	3.80	3.47	3.47	3.16	3.16	2.88	1.82	1.82
100	1.66	1.99	3.47	3.80	3.80	3.47	3.80	3.80	3.80	3.47	3.47	3.16	3.16	2.40	3.47	1.82

5.5.4 Resultados para Alternativa 2B

La Tabla 5.14 a la Tabla 5.17 presentan los resultados correspondientes a la alternativa de cierre 2B.

Tabla 5.14. Alturas de ola $H_{1/10}$ estimadas para el Tramo Norte-Sur de la Alternativa 2B

2B	Cierre - Tramo Norte-Sur															
	Altura de Ola Máxima $H_{1/10}$ (m)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.49	0.56	0.69	0.80	0.86	0.60	0.80	0.69	0.87	0.73	0.70	0.40	0.34	0.24	0.31	0.42
5	0.57	0.68	0.83	1.00	1.06	0.70	0.94	0.86	1.11	0.86	0.83	0.50	0.45	0.29	0.39	0.52
10	0.62	0.76	0.93	1.12	1.18	0.75	1.02	0.99	1.25	0.95	0.89	0.58	0.52	0.32	0.44	0.59
20	0.67	0.84	1.03	1.23	1.30	0.81	1.10	1.09	1.39	1.02	0.93	0.65	0.60	0.36	0.48	0.65
50	0.74	0.94	1.15	1.38	1.45	0.89	1.21	1.23	1.56	1.13	0.97	0.74	0.69	0.41	0.54	0.73
100	0.79	1.01	1.24	1.49	1.54	0.94	1.29	1.34	1.68	1.20	0.98	0.81	0.77	0.45	0.59	0.79

Tabla 5.15. Períodos de pico T_p estimados para el Tramo Norte-Sur de la Alternativa 2B

2B	Cierre - Tramo Norte-Sur															
	Período de Pico T_p (s)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	2.40	2.63	2.88	3.16	3.47	2.88	3.16	2.88	3.16	2.63	2.63	2.19	1.99	1.38	1.99	2.19
5	2.40	2.88	3.16	3.47	3.80	3.16	3.47	3.16	3.47	2.88	2.88	2.40	2.19	1.51	2.19	2.40
10	2.63	2.88	3.47	3.80	3.80	3.16	3.47	3.47	3.47	2.88	2.88	2.40	2.19	1.82	2.19	2.40
20	2.63	3.16	3.47	3.80	3.80	3.16	3.47	3.47	3.80	3.16	2.88	2.63	2.40	1.99	2.40	2.63
50	2.63	3.16	3.47	3.80	4.17	3.47	3.80	3.80	3.80	3.16	3.16	2.63	2.40	1.99	2.40	2.63
100	2.88	3.16	3.80	4.17	4.17	3.47	3.80	3.80	3.80	3.16	3.16	2.88	2.63	2.19	2.63	2.88

Tabla 5.16. Alturas de ola $H_{1/10}$ estimadas para el Tramo Este-Oeste de la Alternativa 2B

2B	Cierre - Tramo Este-Oeste															
	Altura de Ola Máxima $H_{1/10}$ (m)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.46	0.49	0.62	0.72	0.83	0.58	0.80	0.72	0.91	0.96	1.17	0.87	0.92	0.63	0.58	0.51
5	0.52	0.58	0.72	0.90	1.01	0.68	0.95	0.90	1.14	1.10	1.33	1.08	1.17	0.79	0.72	0.63
10	0.57	0.64	0.80	1.01	1.12	0.73	1.03	1.02	1.28	1.18	1.41	1.21	1.31	0.89	0.80	0.71
20	0.62	0.70	0.88	1.12	1.24	0.79	1.10	1.13	1.42	1.26	1.46	1.33	1.43	0.97	0.88	0.79
50	0.67	0.77	0.99	1.25	1.37	0.87	1.20	1.26	1.57	1.38	1.51	1.47	1.58	1.08	0.98	0.88
100	0.72	0.82	1.06	1.36	1.47	0.92	1.27	1.34	1.70	1.46	1.53	1.56	1.68	1.17	1.07	0.96

Tabla 5.17. Períodos de pico T_p estimados para el Tramo Este-Oeste de la Alternativa 2B

2B	Cierre - Tramo Este-Oeste															
	Período de Pico T_p (s)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	2.19	2.40	2.88	3.16	3.16	2.88	3.16	2.88	3.16	3.16	3.47	3.16	3.47	2.88	2.88	2.63
5	2.40	2.63	2.88	3.47	3.47	2.88	3.47	3.16	3.47	3.47	3.80	3.47	3.80	3.16	3.16	2.88
10	2.63	2.63	3.16	3.47	3.47	3.16	3.47	3.47	3.47	3.47	3.80	3.80	3.80	3.47	3.47	2.88
20	2.63	2.88	3.16	3.47	3.80	3.16	3.47	3.47	3.47	3.47	3.80	3.80	4.17	3.47	3.47	3.16
50	2.63	2.88	3.47	3.80	3.80	3.16	3.80	3.47	3.80	3.80	3.80	3.80	4.17	3.80	3.80	3.16
100	2.88	2.88	3.47	3.80	4.17	3.47	3.80	3.80	3.80	3.80	3.80	4.17	4.17	3.80	3.80	3.16

5.5.5 Resultados sobre las márgenes

La **Tabla 5.18** a la **Tabla 5.21** presentan la actualización de resultados de la predicción del oleaje correspondientes a las márgenes derecha e izquierda del embalse para la totalidad de los escenarios analizados.

Tabla 5.18. Alturas de ola $H_{1/10}$ estimadas para la margen derecha del embalse

1A	Margen Derecha															
	Altura de Ola Máxima $H_{1/10}$ (m)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.45	0.40	0.52	0.59	0.67	0.50	0.71	0.71	1.08	1.09	1.14	0.77	0.76	0.50	0.49	0.48
5	0.52	0.48	0.62	0.73	0.82	0.58	0.85	0.91	1.39	1.27	1.33	0.95	0.98	0.61	0.59	0.58
10	0.56	0.53	0.69	0.81	0.91	0.62	0.93	1.04	1.54	1.38	1.41	1.07	1.11	0.68	0.64	0.65
20	0.60	0.59	0.76	0.90	1.01	0.67	1.01	1.16	1.77	1.48	1.46	1.18	1.24	0.75	0.70	0.71
50	0.64	0.65	0.84	0.99	1.12	0.73	1.13	1.32	1.98	1.62	1.52	1.31	1.40	0.85	0.77	0.78
100	0.68	0.71	0.91	1.07	1.21	0.77	1.21	1.44	2.10	1.71	1.53	1.41	1.52	0.91	0.82	0.84

Tabla 5.19. Períodos de pico T_p estimados para la margen derecha del embalse

1A	Margen Derecha															
	Período de Pico T_p (s)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	2.19	1.99	2.63	2.63	2.88	2.63	2.88	2.88	3.47	3.47	3.47	3.16	3.16	2.40	2.40	2.19
5	2.19	2.40	2.63	2.88	3.16	2.88	3.16	3.16	3.80	3.80	3.80	3.47	3.47	3.16	2.63	2.40
10	2.19	2.63	2.88	3.16	3.47	2.88	3.16	3.47	3.80	3.80	3.80	3.47	3.80	3.16	2.63	2.63
20	2.40	2.63	2.88	3.16	3.47	2.88	3.47	3.47	4.17	3.80	3.80	3.80	4.17	3.47	2.88	2.63
50	2.40	2.88	3.16	3.16	3.80	3.16	3.47	3.80	4.57	4.17	3.80	3.80	4.17	3.47	2.88	2.88
100	2.40	2.88	3.16	3.47	3.80	3.16	3.47	3.80	4.57	4.17	3.80	3.80	4.57	3.80	2.88	3.16

Tabla 5.20. Alturas de ola $H_{1/10}$ estimadas para la margen izquierda del embalse

1A	Margen Izquierda															
	Altura de Ola Máxima $H_{1/10}$ (m)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.90	0.96	1.06	1.09	1.12	0.61	0.98	0.61	0.66	0.59	0.86	0.74	0.89	0.67	0.72	0.80
5	1.05	1.12	1.23	1.30	1.32	0.90	1.10	0.71	0.80	0.68	1.02	0.93	1.18	0.84	0.90	0.97
10	1.12	1.20	1.34	1.43	1.44	0.95	1.18	0.80	0.89	0.74	1.09	1.07	1.35	0.96	1.02	1.07
20	1.19	1.30	1.44	1.55	1.56	1.02	1.25	0.88	0.97	0.79	1.13	1.19	1.42	1.06	1.14	1.19
50	1.29	1.42	1.56	1.69	1.69	1.10	1.34	0.99	1.08	0.87	1.17	1.35	1.45	1.20	1.28	1.32
100	1.37	1.49	1.66	1.80	1.78	1.17	1.40	1.06	1.16	0.92	1.19	1.46	1.54	1.30	1.38	1.43

Tabla 5.21. Períodos de pico T_p estimados para la margen izquierda del embalse

1A	Margen Izquierda															
	Período de Pico T_p (s)															
TR (años)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	2.63	2.88	3.16	3.16	3.47	2.88	3.16	3.16	3.16	3.16	3.47	3.16	3.47	2.88	2.88	2.88
5	2.88	3.16	3.47	3.47	3.47	3.16	3.47	3.16	3.47	3.47	3.80	3.47	3.80	3.16	3.16	3.16
10	2.88	3.16	3.47	3.80	3.80	3.16	3.47	3.47	3.47	3.47	3.80	3.47	3.80	3.47	3.47	3.16
20	3.16	3.16	3.47	3.80	3.80	3.16	3.47	3.47	3.47	3.47	3.80	3.80	3.80	3.47	3.47	3.47
50	3.16	3.47	3.80	3.80	4.17	3.47	3.80	3.47	3.16	3.47	3.80	3.80	3.80	3.47	3.47	3.47
100	3.16	3.47	3.80	4.17	4.17	3.47	3.80	3.80	3.47	3.80	3.80	4.17	3.80	3.80	3.80	3.80

5.5.6 Envoltentes y exposición

Como complemento se presentan gráficos de envoltentes para la Alternativa A1, que permiten identificar la máxima altura significativa del oleaje asociada a un período de retorno en particular considerando todas las direcciones de incidencia de las olas. De allí surgen las ubicaciones potencialmente más vulnerables a lo largo de cada uno de los tres tramos costeros.

La **Figura 5.9** a la **Figura 5.11** muestran los gráficos de envolventes asociadas a $Tr = 10$ años correspondientes al tramo de cierre, al de margen derecha y al de margen izquierda, respectivamente, en función de la progresiva.

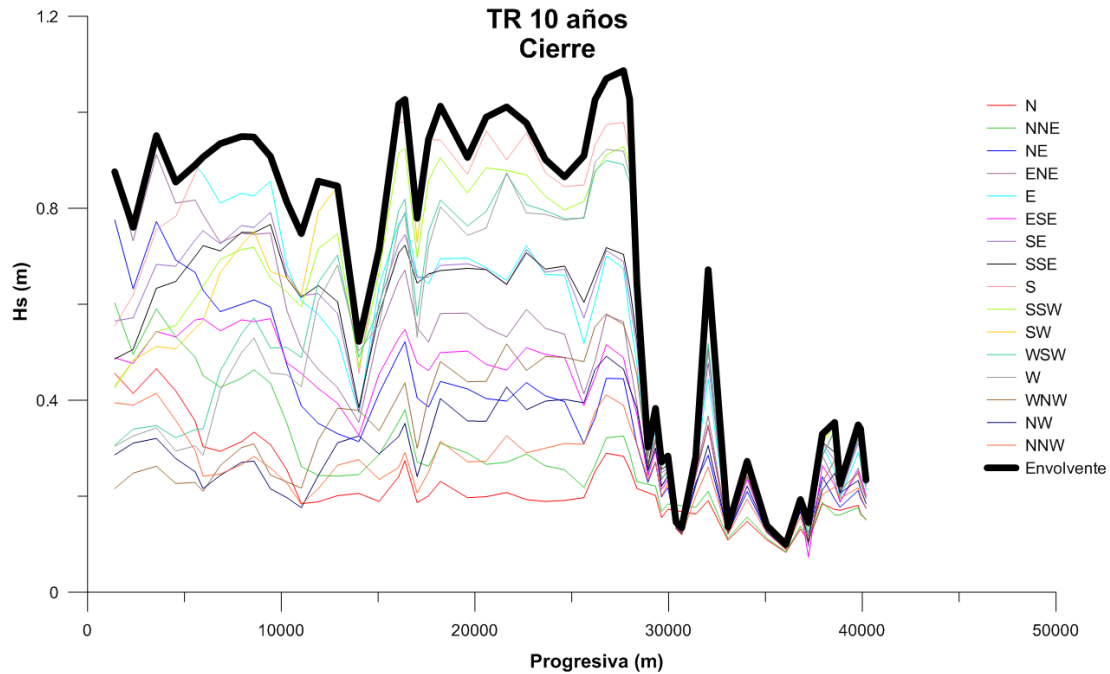


Figura 5.9. Envolvente de altura de ola H_s (m) sobre la progresiva de cierre del embalse. Alternativa A1.

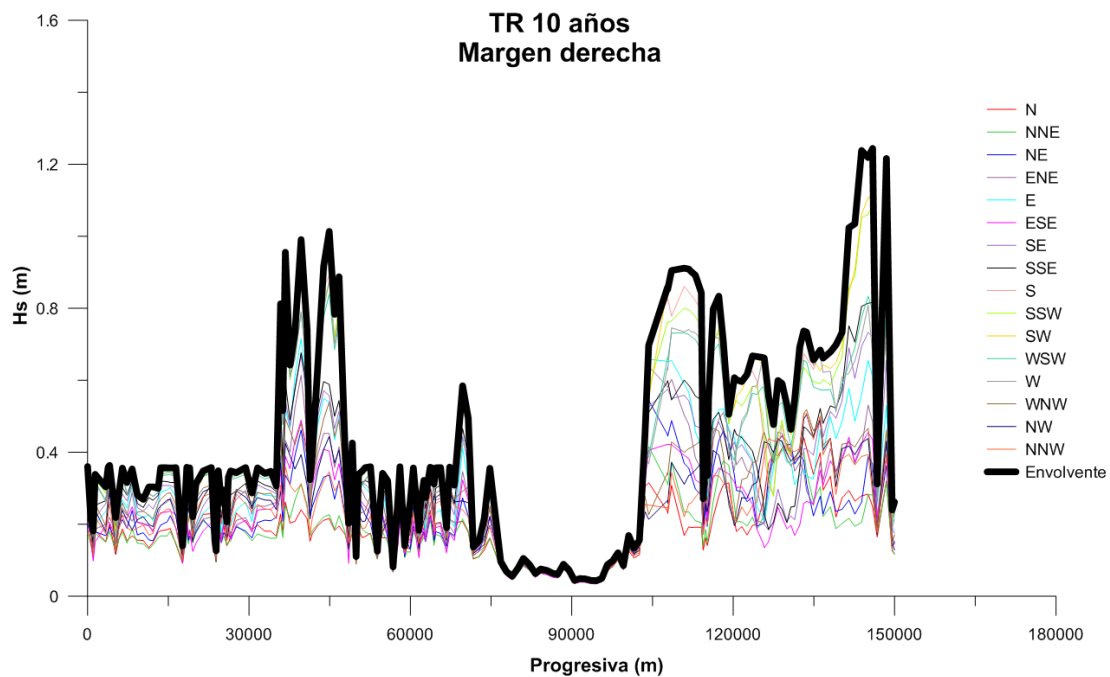


Figura 5.10. Envolvente de altura de ola H_s (m) a lo largo de la margen derecha del embalse. Alternativa A1.

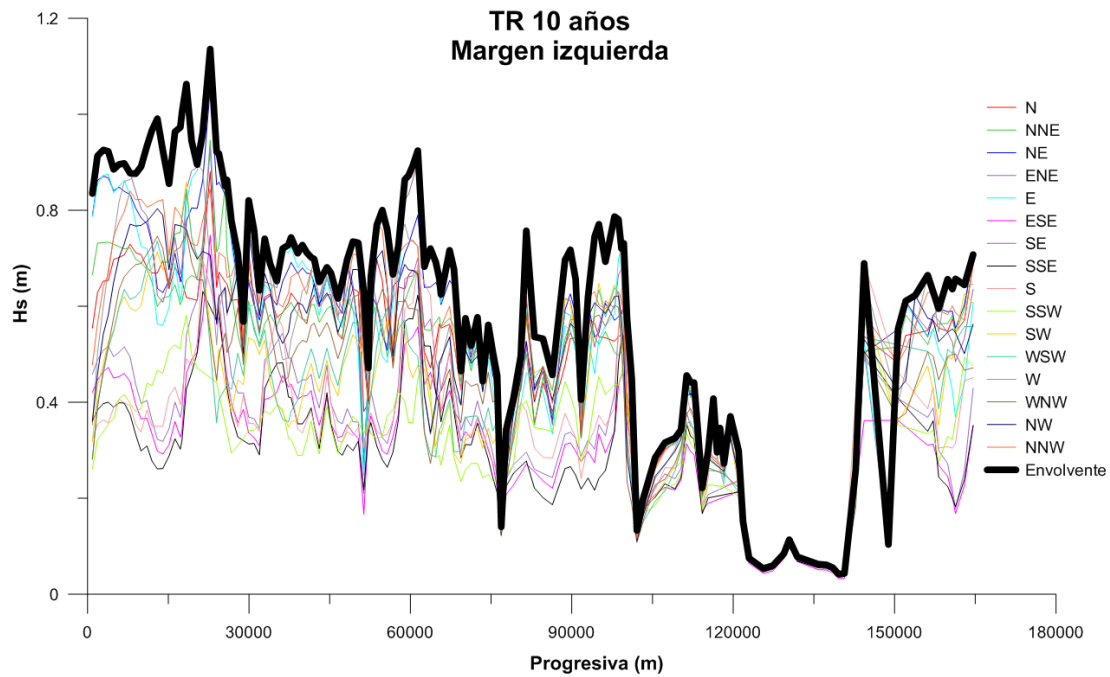


Figura 5.11. Envoltente de altura de ola H_s (m) a lo largo de la margen izquierda del embalse. Alternativa A1.

Finalmente, la **Figura 5.12** y la **Figura 5.13** muestran el grado de exposición frente a la acción del oleaje estimado a lo largo de todo el contorno del embalse para los períodos de retorno de $Tr = 10$ y $Tr = 100$ años, respectivamente. La escala de colores identifica la magnitud de la máxima altura significativa de ola esperable en cada ubicación.

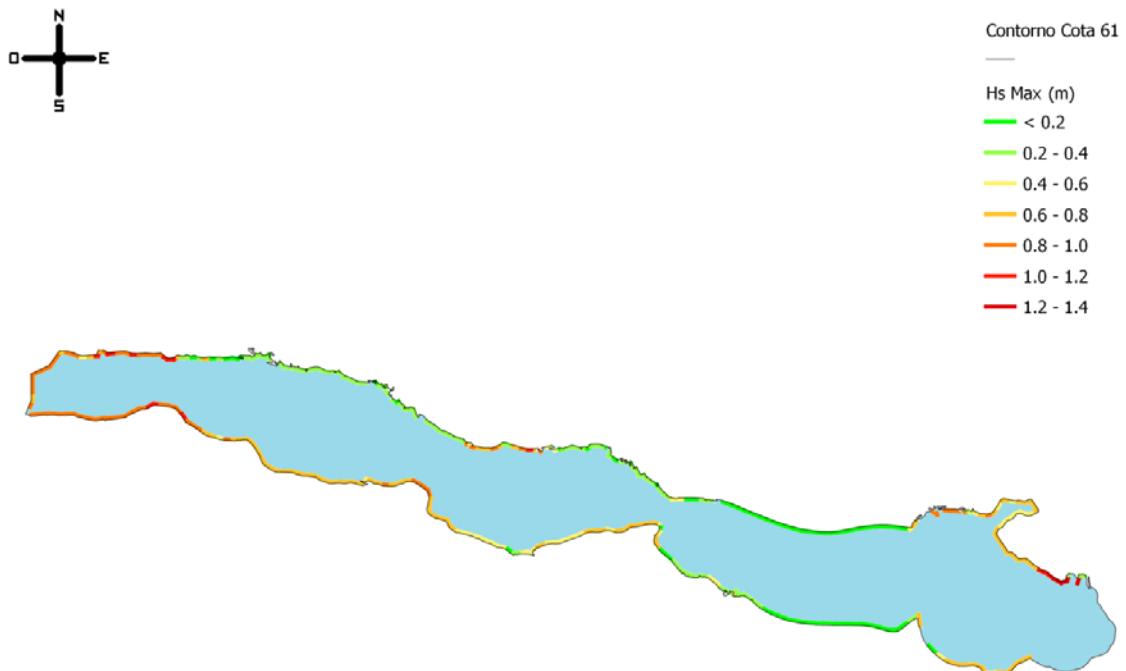


Figura 5.12. Altura de ola H_s (m) sobre el contorno del embalse para $Tr = 10$ años. Alternativa A1.



Figura 5.13. Altura de ola H_s (m) sobre el contorno del embalse para $Tr = 100$ años. Alternativa A1.

5.6 Registro de vientos en San Cosme

En esta etapa del estudio se dispuso de registro de vientos obtenido en la Torre de Medición Eólica de San Cosme. Si bien se trata de una serie de datos de corta duración, la proximidad de esta localidad con la zona del proyecto sugiere la posibilidad de utilizar dicha información como un aporte complementario a los datos utilizados, correspondientes a la estación Posadas.

El registro de vientos obtenido en la Torre de Medición Eólica de San Cosme abarca el período comprendido entre el 17 de febrero y el 11 de noviembre de 2017, con algunas interrupciones temporarias. La información disponible consiste en intensidades de viento medidas cada 10 min por un anemómetro ubicado a 30 m de altura, careciendo del dato direccional.

Los valores de intensidad fueron convertidos a una altura de referencia de 10 m, debido a que es así como se utilizan en la práctica para las predicciones de altura de olas. Para ello se utilizó en denominado “Método de la Ley de Potencia”, en el cual se plantea la siguiente expresión:

$$V/V_r = (H/H_r)^{Sf}$$

siendo

V_r = velocidad del viento a la altura referencia u original

H_r = altura referencia u original

V = velocidad del viento a la nueva altura

H = nueva altura donde la nueva velocidad se desea calcular

Sf = factor de corte obtenido por métodos experimentales

En este caso, los valores utilizados fueron: Vr = velocidades registradas a 30 m; H = 10 m; Hr = 30 m; Sf = 0.21 (valor adoptado de tablas, correspondiente a una zona con barreras, cercos y bardas).

La **Figura 5.14** muestra la serie cronológica de intensidades disponible para San Cosme (referida a 10 m de altura) correspondiente a valores promediados en la hora, junto a la información disponible en Posadas para el año 2017 (período enero-abril). Si bien el período de tiempo para el cual ambos registros se solapan es reducido, la figura da idea de una compatibilidad aceptable en la comparación de las dos series de datos.

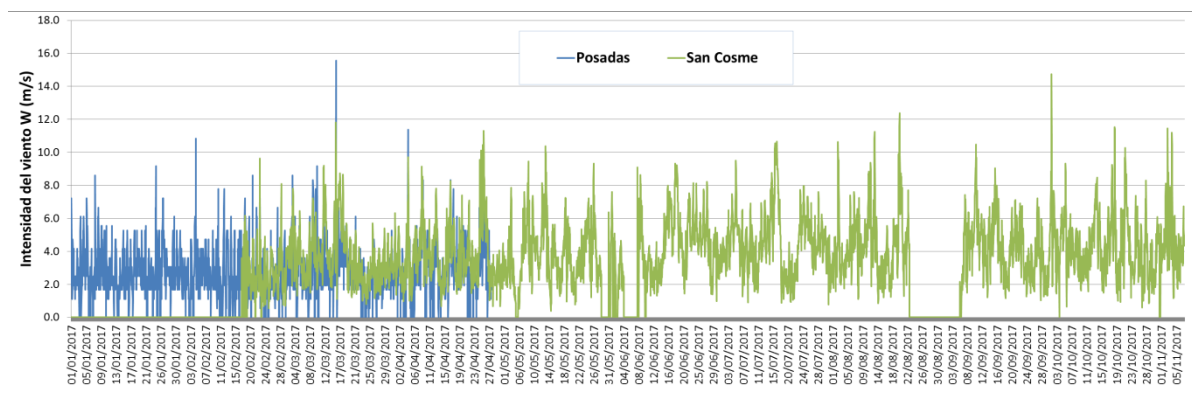


Figura 5.14. Registro cronológico del viento disponible en San Cosme y en Posadas para el año 2017

La **Tabla 5.22** presenta una síntesis estadística para ambas fuentes de información, indicando los parámetros más significativos para la caracterización de los registros de intensidad del viento.

Tabla 5.22. Resumen estadístico de los registros de viento

Estadística descriptiva	Posadas (2001-2016)	San Cosme (Feb-Nov 2017)
Media	2.71	4.07
Mediana	2.59	3.79
Moda	1.67	3.13
Desviación estándar	1.63	1.81
Varianza de la muestra	2.66	3.28
Coficiente de asimetría	1.27	0.88
Rango	20.56	14.35
Mínimo	0.00	0.39
Máximo	20.56	14.74

5.7 Temporal del 25 de abril de 2017

El día 25 de abril de 2017 tuvo lugar un temporal meteorológico de una magnitud significativa que abarcó una extensa región del norte de la Provincia de Corrientes, durante el cual se observaron vientos de elevada intensidad soplando en forma sostenida por varias horas.

En esa fecha, las olas registradas en el olígrafo del embalse de Yacyretá alcanzaron un máximo de $H_s = 1,95$ m. Este fenómeno provocó algunos daños localizados sobre la obra de defensa del terraplén de cierre de la represa. Según estimaciones del SMN, la intensidad del viento alcanzó el valor de $W = 60$ km/h en Posadas.

Por su parte, los vientos máximos registrados en San Cosme durante el temporal alcanzaron el valor de $W = 20,0$ m/s (referido a la altura de 10 m). El registro completo de San Cosme fue utilizado para realizar una simulación de la evolución del oleaje en el embalse Yacyretá, donde los datos de viento para esa fecha resultan poco confiables.

La aplicación de SWAN para la simulación del evento mencionado permitió obtener los resultados presentados en la **Figura 5.15**. La misma muestra la comparación entre las alturas de olas significativas registradas por el olígrafo y los valores de H_s (m) estimados por el modelo. Al no tener información específica sobre la dirección del viento registrado en San Cosme, pero sabiendo por información de Yacyretá que el viento provino del cuadrante Este, para esta evaluación se realizaron tres simulaciones diferentes, suponiendo en cada caso una dirección de viento constante coincidente con el Este, el ENE y el ESE, respectivamente.

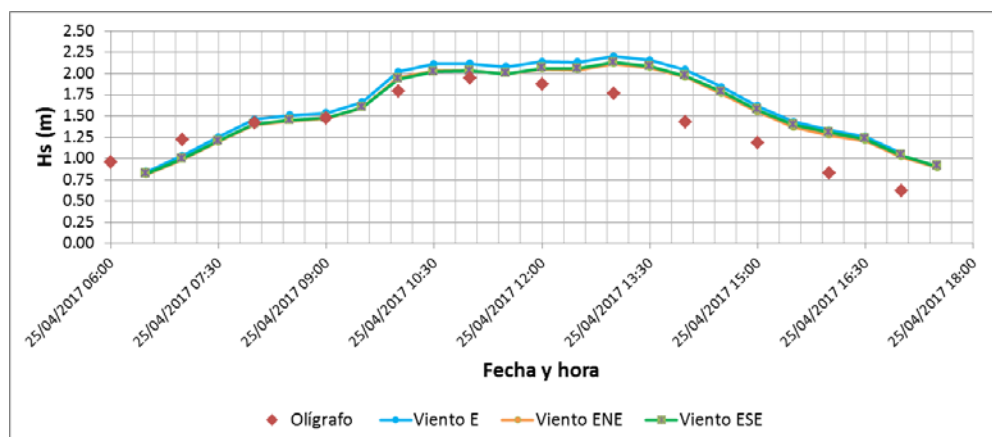


Figura 5.15. Temporal del 25 de abril de 2017 en Yacyretá

La **Figura 5.15** muestra una buena aproximación entre los valores estimados y los datos registrados en la primera mitad del evento, donde las máximas alturas de ola registradas para esa fecha se encuentran bien representadas. Para la segunda mitad del evento (a partir de las 12 del mediodía), las diferencias entre valores observados y simulados podrían explicarse por cambios en el desarrollo del temporal, que pueden reflejarse en diferencias entre las intensidades o direcciones de los vientos reinantes en cada sitio.

Los mismos datos de vientos utilizados en el caso anterior fueron aplicados para la reproducción hipotética del temporal del 25 de abril sobre el embalse de Itatí-Itacorá. La **Figura 5.16** muestra el mapa de alturas significativas del oleaje que se obtendría en tal caso para el instante de máxima intensidad del viento.

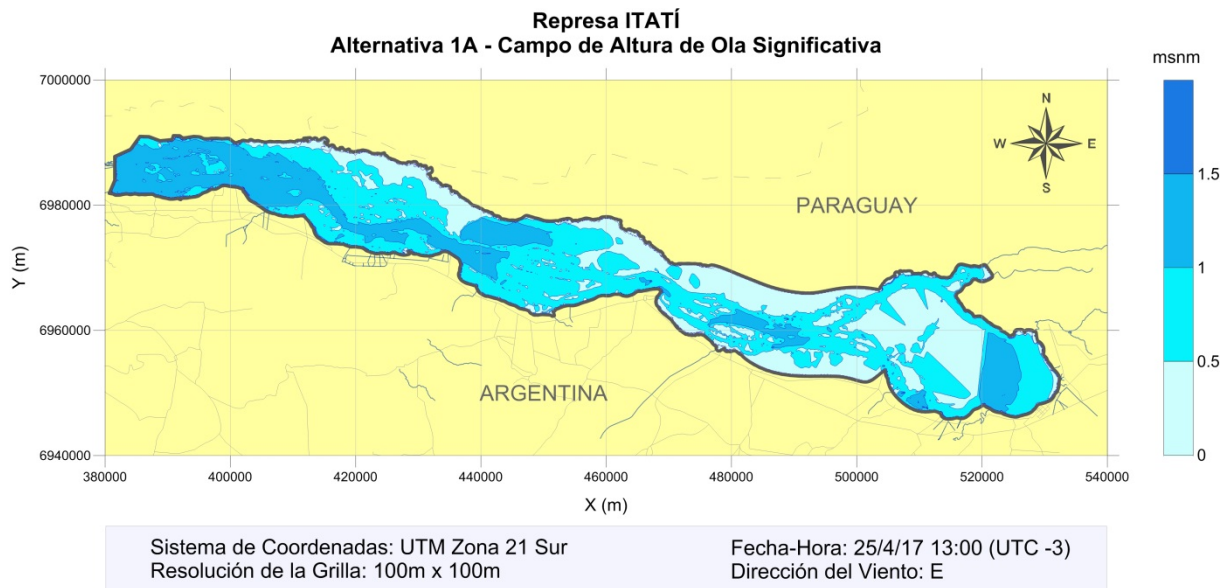


Figura 5.16. Simulación del oleaje en Itatí-Itacorá utilizando vientos del 25 de abril de 2017

Ampliando estos resultados, en la **Tabla 5.23** a la **Tabla 5.26** se indican los resultados que caracterizan la evolución del temporal sobre el embalse Itatí-Itacorá considerando las distintas alternativas de cierre proyectadas.

Del mismo modo que para el caso de Yacyretá, se evaluaron tres escenarios diferentes considerando una dirección del viento constante en cada caso: Viento E, Viento ENE y Viento ESE. A los efectos de mejorar la descripción en cuanto a la evolución del temporal, los datos de intensidad del viento utilizados en estas simulaciones corresponden a valores promediados cada 30 minutos. Los resultados indican un valor máximo de altura de ola esperable sobre el cierre del embalse para la condición de temporal analizada corresponde a la alternativa 1B, con $H_{1/10} = 1,77$ m y período de pico de $T_p = 4,05$ s.

Tabla 5.23. Resultados de la simulación del oleaje en Itatí-Itacorá con vientos del 25 de abril de 2017. Alternativa 1A

MARGEN	FECHA - HORA	ENE					E					ESE				
		H _s Máx	H _{1/10} Máx	T _p	X	Y	H _s Máx	H _{1/10} Máx	T _p	X	Y	H _s Máx	H _{1/10} Máx	T _p	X	Y
Izquierda	25/4/17 6:00	0.73	0.92	2.94	403680	6980897	0.73	0.93	3.45	401657	6983075	0.70	0.88	3.45	401657	6983075
	25/4/17 7:00	0.92	1.17	3.45	401657	6983075	0.93	1.18	3.45	401657	6983075	0.89	1.13	3.45	401657	6983075
	25/4/17 8:00	1.01	1.29	4.05	401657	6983075	1.02	1.30	4.05	401657	6983075	0.98	1.24	4.05	401657	6983075
	25/4/17 9:00	1.08	1.37	4.05	401657	6983075	1.09	1.38	4.05	401657	6983075	1.04	1.32	4.05	401657	6983075
	25/4/17 10:00	1.45	1.84	4.05	402650	6982113	1.45	1.84	4.05	402650	6982113	1.25	1.59	4.05	401657	6983075
	25/4/17 11:00	1.43	1.81	4.05	402650	6982113	1.28	1.63	4.05	401657	6983075	1.22	1.55	4.05	401657	6983075
	25/4/17 12:00	1.29	1.64	4.05	401657	6983075	1.28	1.63	4.05	401657	6983075	1.22	1.55	4.05	401657	6983075
	25/4/17 13:00	1.45	1.85	4.05	402650	6982113	1.32	1.67	4.05	401657	6983075	1.25	1.59	4.05	401657	6983075
	25/4/17 14:00	1.20	1.53	4.05	401657	6983075	1.19	1.52	4.05	401657	6983075	1.13	1.44	4.05	401657	6983075
	25/4/17 15:00	0.97	1.24	4.05	383725	6982151	0.95	1.21	4.05	401657	6983075	0.90	1.15	4.05	401657	6983075
25/4/17 16:00	0.88	1.12	3.45	403680	6980897	0.84	1.07	3.45	401657	6983075	0.80	1.02	3.45	401657	6983075	
25/4/17 17:00	0.73	0.92	3.45	403318	6981113	0.65	0.83	3.45	520024	6948355	0.63	0.80	3.45	436777	6971606	
Derecha	25/4/17 6:00	0.52	0.67	2.94	504131	6966588	0.56	0.71	2.94	445693	6977220	0.60	0.76	2.94	445693	6977220
	25/4/17 7:00	0.63	0.80	2.94	504131	6966588	0.69	0.88	3.45	445693	6977220	0.74	0.94	3.45	524630	6958705
	25/4/17 8:00	0.70	0.88	2.94	504131	6966588	0.76	0.97	3.45	445693	6977220	0.82	1.04	3.45	524630	6958705
	25/4/17 9:00	0.73	0.93	2.94	504131	6966588	0.82	1.04	3.45	445693	6977220	0.87	1.11	3.45	524630	6958705
	25/4/17 10:00	0.88	1.12	3.45	504131	6966588	0.98	1.25	4.05	445693	6977220	1.07	1.36	3.45	524630	6958705
	25/4/17 11:00	0.85	1.08	3.45	504131	6966588	0.95	1.21	4.05	445693	6977220	1.05	1.33	4.05	524630	6958705
	25/4/17 12:00	0.86	1.09	3.45	504131	6966588	0.96	1.22	4.05	445693	6977220	1.05	1.34	4.05	524630	6958705
	25/4/17 13:00	0.89	1.13	3.45	504131	6966588	1.00	1.27	4.05	445693	6977220	1.09	1.39	4.05	524630	6958705
	25/4/17 14:00	0.78	0.99	3.45	504131	6966588	0.89	1.13	3.45	445693	6977220	0.96	1.22	3.45	524630	6958705
	25/4/17 15:00	0.60	0.76	2.94	504131	6966588	0.70	0.89	3.45	445693	6977220	0.76	0.97	3.45	445693	6977220
25/4/17 16:00	0.52	0.67	2.94	504131	6966588	0.61	0.78	3.45	445693	6977220	0.67	0.85	3.45	445693	6977220	
25/4/17 17:00	0.42	0.53	2.94	445693	6977220	0.49	0.62	2.94	445693	6977220	0.54	0.68	2.94	445693	6977220	
Cierre	25/4/17 6:00	0.67	0.86	3.45	381926	6985113	0.70	0.89	3.45	381926	6985113	0.68	0.87	3.45	381924	6987113
	25/4/17 7:00	0.87	1.10	3.45	381926	6985113	0.91	1.15	3.45	381926	6985113	0.87	1.10	3.45	381926	6985113
	25/4/17 8:00	0.96	1.22	3.45	381926	6985113	1.00	1.28	3.45	381926	6985113	0.97	1.23	3.45	381926	6985113
	25/4/17 9:00	1.02	1.30	4.05	381926	6985113	1.07	1.35	4.05	381926	6985113	1.02	1.30	4.05	381926	6985113
	25/4/17 10:00	1.25	1.59	4.05	381926	6985113	1.30	1.65	4.05	381926	6985113	1.26	1.60	4.05	381926	6985113
	25/4/17 11:00	1.23	1.56	4.05	381926	6985113	1.27	1.61	4.05	381926	6985113	1.22	1.55	4.05	381926	6985113
	25/4/17 12:00	1.23	1.56	4.05	381926	6985113	1.27	1.61	4.05	381926	6985113	1.22	1.55	4.05	381926	6985113
	25/4/17 13:00	1.27	1.61	4.05	381926	6985113	1.31	1.66	4.05	381926	6985113	1.26	1.60	4.05	381926	6985113
	25/4/17 14:00	1.15	1.46	4.05	381926	6985113	1.17	1.49	4.05	381926	6985113	1.13	1.43	4.05	381926	6985113
	25/4/17 15:00	0.92	1.17	4.05	381926	6985113	0.93	1.18	4.05	381926	6985113	0.88	1.12	3.45	381926	6985113
25/4/17 16:00	0.80	1.01	3.45	381926	6985113	0.80	1.02	3.45	381926	6985113	0.76	0.96	3.45	384812	6989307	
25/4/17 17:00	0.63	0.81	3.45	381560	6983036	0.63	0.80	3.45	381926	6985113	0.60	0.76	3.45	381926	6985113	

Tabla 5.24. Resultados de la simulación del oleaje en Itatí-Itacorá con vientos del 25 de abril de 2017. Alternativa 1B

1B		ENE					E					ESE				
MARGEN	FECHA - HORA	H _s Máx	H _{1/10} Máx	T _p	X	Y	H _s Máx	H _{1/10} Máx	T _p	X	Y	H _s Máx	H _{1/10} Máx	T _p	X	Y
Izquierda	25/4/17 6:00	0.71	0.90	3.45	436777	6971606	0.71	0.90	3.45	436777	6971606	0.68	0.86	3.45	436777	6971606
	25/4/17 7:00	0.89	1.13	3.45	436777	6971606	0.91	1.16	3.45	436777	6971606	0.87	1.10	3.45	436777	6971606
	25/4/17 8:00	0.99	1.25	3.45	436777	6971606	1.01	1.28	3.45	436777	6971606	0.96	1.22	3.45	436777	6971606
	25/4/17 9:00	1.04	1.32	3.45	436777	6971606	1.06	1.34	4.05	436777	6971606	1.01	1.29	4.05	436777	6971606
	25/4/17 10:00	1.27	1.62	4.05	402650	6982113	1.30	1.65	4.05	402650	6982113	1.23	1.56	4.05	402650	6982113
	25/4/17 11:00	1.24	1.58	4.05	402650	6982113	1.26	1.60	4.05	402650	6982113	1.20	1.52	4.05	402650	6982113
	25/4/17 12:00	1.24	1.58	4.05	402650	6982113	1.26	1.60	4.05	402650	6982113	1.20	1.52	4.05	402650	6982113
	25/4/17 13:00	1.28	1.63	4.05	402650	6982113	1.30	1.65	4.05	402650	6982113	1.23	1.57	4.05	402650	6982113
	25/4/17 14:00	1.16	1.47	4.05	383725	6982151	1.16	1.48	4.05	402650	6982113	1.10	1.40	4.05	401657	6983075
	25/4/17 15:00	0.94	1.20	4.05	404650	6980265	0.91	1.16	4.05	436777	6971606	0.88	1.11	3.45	436777	6971606
25/4/17 16:00	0.83	1.06	4.05	520024	6948355	0.81	1.03	3.45	436777	6971606	0.77	0.98	3.45	436777	6971606	
25/4/17 17:00	0.69	0.88	3.45	520024	6948355	0.65	0.83	3.45	436777	6971606	0.63	0.80	3.45	436777	6971606	
Derecha	25/4/17 6:00	0.53	0.68	2.94	504131	6966588	0.56	0.71	2.94	445693	6977220	0.60	0.76	2.94	445693	6977220
	25/4/17 7:00	0.64	0.82	2.94	504131	6966588	0.70	0.89	3.45	445693	6977220	0.74	0.94	3.45	445693	6977220
	25/4/17 8:00	0.71	0.90	2.94	504131	6966588	0.77	0.98	3.45	445693	6977220	0.82	1.04	3.45	445693	6977220
	25/4/17 9:00	0.74	0.94	3.45	504131	6966588	0.82	1.05	3.45	445693	6977220	0.88	1.12	3.45	445693	6977220
	25/4/17 10:00	0.90	1.14	3.45	504131	6966588	1.00	1.26	3.45	445693	6977220	1.07	1.35	3.45	524630	6958705
	25/4/17 11:00	0.87	1.10	3.45	504131	6966588	0.96	1.23	4.05	445693	6977220	1.03	1.31	4.05	524630	6958705
	25/4/17 12:00	0.88	1.11	3.45	504131	6966588	0.98	1.24	4.05	445693	6977220	1.04	1.32	4.05	445693	6977220
	25/4/17 13:00	0.91	1.15	3.45	504131	6966588	1.01	1.28	4.05	445693	6977220	1.08	1.37	4.05	524630	6958705
	25/4/17 14:00	0.79	1.01	3.45	504131	6966588	0.89	1.14	3.45	445693	6977220	0.97	1.23	3.45	445693	6977220
	25/4/17 15:00	0.61	0.78	2.94	504131	6966588	0.70	0.89	3.45	445693	6977220	0.78	0.99	3.45	445693	6977220
25/4/17 16:00	0.54	0.68	2.94	504131	6966588	0.61	0.78	3.45	445693	6977220	0.68	0.86	3.45	445693	6977220	
25/4/17 17:00	0.42	0.53	2.50	504131	6966588	0.49	0.62	2.94	445693	6977220	0.55	0.70	2.94	445693	6977220	
Cierre	25/4/17 6:00	0.71	0.91	3.45	381444	6982758	0.69	0.88	3.45	381926	6984867	0.68	0.87	3.45	389021	6988317
	25/4/17 7:00	0.93	1.18	3.45	381444	6982758	0.91	1.15	3.45	381444	6982758	0.88	1.11	3.45	383600	6988051
	25/4/17 8:00	1.04	1.32	4.05	381444	6982758	1.01	1.29	4.05	381444	6982758	0.97	1.23	3.45	381925	6987073
	25/4/17 9:00	1.13	1.43	4.05	381444	6982758	1.10	1.40	4.05	381444	6982758	1.02	1.30	4.05	383600	6988051
	25/4/17 10:00	1.36	1.73	4.05	381444	6982758	1.33	1.69	4.05	381444	6982758	1.26	1.60	4.05	381926	6984867
	25/4/17 11:00	1.34	1.70	4.05	381444	6982758	1.31	1.66	4.05	381444	6982758	1.22	1.55	4.05	381926	6984867
	25/4/17 12:00	1.35	1.72	4.05	381444	6982758	1.32	1.67	4.05	381444	6982758	1.23	1.56	4.05	437862	6976500
	25/4/17 13:00	1.39	1.77	4.05	381444	6982758	1.35	1.72	4.05	381444	6982758	1.27	1.61	4.05	437862	6976500
	25/4/17 14:00	1.26	1.60	4.05	381444	6982758	1.23	1.56	4.05	381444	6982758	1.13	1.43	4.05	383600	6988051
	25/4/17 15:00	1.00	1.28	4.05	381444	6982758	0.97	1.23	4.05	381444	6982758	0.90	1.14	4.05	437862	6976500
25/4/17 16:00	0.86	1.10	4.05	381444	6982758	0.83	1.06	4.05	381444	6982758	0.78	0.99	3.45	437862	6976500	
25/4/17 17:00	0.68	0.87	3.45	381444	6982758	0.66	0.84	3.45	381444	6982758	0.62	0.79	3.45	438815	6977052	

Tabla 5.25. Resultados de la simulación del oleaje en Itatí-Itacorá con vientos del 25 de abril de 2017. Alternativa 2A

2A		ENE					E					ESE				
MARGEN	FECHA - HORA	H _s Máx	H _{1/10} Máx	T _p	X	Y	H _s Máx	H _{1/10} Máx	T _p	X	Y	H _s Máx	H _{1/10} Máx	T _p	X	Y
Izquierda	25/4/17 6:00	0.70	0.89	3.45	402650	6982113	0.70	0.89	3.45	436777	6971606	0.67	0.85	3.45	436777	6971606
	25/4/17 7:00	0.91	1.15	3.45	402650	6982113	0.90	1.15	3.45	436777	6971606	0.86	1.10	3.45	436777	6971606
	25/4/17 8:00	1.00	1.28	4.05	402650	6982113	1.00	1.27	4.05	402650	6982113	0.96	1.21	3.45	436777	6971606
	25/4/17 9:00	1.06	1.35	4.05	402650	6982113	1.05	1.34	4.05	401657	6983075	1.01	1.28	3.45	436777	6971606
	25/4/17 10:00	1.32	1.67	4.05	402650	6982113	1.31	1.66	4.05	402650	6982113	1.23	1.56	4.05	401657	6983075
	25/4/17 11:00	1.29	1.64	4.05	402650	6982113	1.27	1.61	4.05	401657	6983075	1.20	1.53	4.05	401657	6983075
	25/4/17 12:00	1.29	1.63	4.05	402650	6982113	1.27	1.61	4.05	401657	6983075	1.20	1.52	4.05	401657	6983075
	25/4/17 13:00	1.33	1.68	4.05	402650	6982113	1.31	1.66	4.05	401657	6983075	1.23	1.57	4.05	401657	6983075
	25/4/17 14:00	1.20	1.52	4.05	401657	6983075	1.18	1.50	4.05	401657	6983075	1.11	1.40	4.05	401657	6983075
	25/4/17 15:00	0.97	1.24	4.05	404650	6980265	0.92	1.17	4.05	401657	6983075	0.88	1.11	3.45	436777	6971606
Derecha	25/4/17 6:00	0.85	1.07	3.45	404650	6980265	0.79	1.01	3.45	436777	6971606	0.77	0.97	3.45	436777	6971606
	25/4/17 7:00	0.70	0.89	3.45	520024	6948355	0.64	0.81	3.45	436777	6971606	0.61	0.78	3.45	436777	6971606
	25/4/17 8:00	0.52	0.66	2.94	504131	6966588	0.56	0.71	2.94	445693	6977220	0.60	0.76	2.94	445693	6977220
	25/4/17 9:00	0.62	0.79	2.94	504131	6966588	0.70	0.88	3.45	445693	6977220	0.74	0.94	3.45	524630	6958705
	25/4/17 10:00	0.69	0.87	2.94	504131	6966588	0.77	0.98	3.45	445693	6977220	0.82	1.04	3.45	524630	6958705
	25/4/17 11:00	0.72	0.92	2.94	504131	6966588	0.82	1.05	3.45	445693	6977220	0.88	1.12	3.45	445693	6977220
	25/4/17 12:00	0.88	1.12	3.45	504131	6966588	0.99	1.26	4.05	445693	6977220	1.07	1.36	3.45	524630	6958705
	25/4/17 13:00	0.85	1.08	3.45	504131	6966588	0.96	1.23	4.05	445693	6977220	1.05	1.33	4.05	524630	6958705
	25/4/17 14:00	0.85	1.08	3.45	504131	6966588	0.97	1.24	4.05	445693	6977220	1.05	1.34	3.45	524630	6958705
	25/4/17 15:00	0.88	1.12	3.45	504131	6966588	1.01	1.28	4.05	445693	6977220	1.09	1.39	4.05	524630	6958705
Cierre	25/4/17 16:00	0.77	0.98	3.45	504131	6966588	0.90	1.14	3.45	445693	6977220	0.97	1.23	3.45	445693	6977220
	25/4/17 17:00	0.41	0.52	2.94	445693	6977220	0.49	0.62	2.94	445693	6977220	0.54	0.69	2.94	445693	6977220
	25/4/17 6:00	0.65	0.83	3.45	398455	6983624	0.67	0.86	3.45	398461	6984639	0.69	0.88	3.45	398891	6987557
	25/4/17 7:00	0.83	1.05	3.45	398455	6983624	0.86	1.10	3.45	398461	6984639	0.88	1.12	3.45	398891	6987557
	25/4/17 8:00	0.92	1.17	3.45	398461	6984639	0.96	1.22	4.05	398461	6984639	0.98	1.24	4.05	398891	6987557
	25/4/17 9:00	0.99	1.25	4.05	398455	6983624	1.03	1.31	4.05	398461	6984639	1.04	1.32	4.05	398891	6987557
	25/4/17 10:00	1.20	1.52	4.05	398455	6983624	1.24	1.57	4.05	398461	6984639	1.24	1.58	4.05	398891	6987557
	25/4/17 11:00	1.18	1.50	4.05	398455	6983624	1.22	1.54	4.05	398461	6984639	1.21	1.54	4.05	398891	6987557
	25/4/17 12:00	1.20	1.52	4.05	398455	6983624	1.22	1.55	4.05	398461	6984639	1.22	1.55	4.05	398891	6987557
	25/4/17 13:00	1.23	1.56	4.05	398455	6983624	1.25	1.59	4.05	398461	6984639	1.26	1.59	4.05	398891	6987557
25/4/17 14:00	1.12	1.42	4.05	398455	6983624	1.14	1.45	4.05	398461	6984639	1.14	1.45	4.05	399465	6988394	
25/4/17 15:00	0.90	1.14	4.05	398455	6983624	0.92	1.17	4.05	398461	6984639	0.93	1.18	4.05	399465	6988394	
25/4/17 16:00	0.77	0.98	3.45	398455	6983624	0.79	1.01	3.45	398461	6984639	0.80	1.02	3.45	399465	6988394	
25/4/17 17:00	0.61	0.78	3.45	398461	6984639	0.64	0.81	3.45	398461	6984639	0.64	0.82	3.45	399465	6988394	

Tabla 5.26. Resultados de la simulación del oleaje en Itatí-Itacorá con vientos del 25 de abril de 2017. Alternativa 2B

MARGEN	FECHA - HORA	ENE					E					ESE				
		H _s Máx	H _{1/10} Máx	T _p	X	Y	H _s Máx	H _{1/10} Máx	T _p	X	Y	H _s Máx	H _{1/10} Máx	T _p	X	Y
Izquierda	25/4/17 6:00	0.68	0.86	2.94	436777	6971606	0.69	0.88	3.45	436777	6971606	0.66	0.84	3.45	436777	6971606
	25/4/17 7:00	0.87	1.10	3.45	402650	6982113	0.89	1.13	3.45	436777	6971606	0.86	1.09	3.45	436777	6971606
	25/4/17 8:00	0.97	1.23	3.45	436777	6971606	0.99	1.25	4.05	402650	6982113	0.95	1.20	3.45	436777	6971606
	25/4/17 9:00	1.02	1.29	3.45	436777	6971606	1.04	1.32	4.05	402650	6982113	1.00	1.27	3.45	436777	6971606
	25/4/17 10:00	1.26	1.60	4.05	402650	6982113	1.28	1.63	4.05	402650	6982113	1.22	1.55	4.05	402650	6982113
	25/4/17 11:00	1.24	1.57	4.05	402650	6982113	1.25	1.59	4.05	402650	6982113	1.19	1.51	4.05	402650	6982113
	25/4/17 12:00	1.24	1.57	4.05	402650	6982113	1.25	1.59	4.05	402650	6982113	1.19	1.52	4.05	401657	6983075
	25/4/17 13:00	1.28	1.62	4.05	402650	6982113	1.29	1.64	4.05	402650	6982113	1.23	1.56	4.05	402650	6982113
	25/4/17 14:00	1.16	1.48	4.05	403680	6980897	1.16	1.47	4.05	401657	6983075	1.10	1.40	4.05	401657	6983075
	25/4/17 15:00	0.99	1.25	4.05	404650	6980265	0.93	1.18	4.05	404650	6980265	0.87	1.10	3.45	436777	6971606
	25/4/17 16:00	0.84	1.07	3.45	404650	6980265	0.79	1.00	3.45	436777	6971606	0.75	0.96	3.45	436777	6971606
	25/4/17 17:00	0.65	0.83	3.45	520024	6948355	0.63	0.80	3.45	436019	6972154	0.60	0.76	3.45	436777	6971606
Derecha	25/4/17 6:00	0.52	0.67	2.94	504131	6966588	0.56	0.71	2.94	445693	6977220	0.61	0.78	2.94	445693	6977220
	25/4/17 7:00	0.63	0.80	2.94	504131	6966588	0.69	0.88	3.45	445693	6977220	0.76	0.96	3.45	445693	6977220
	25/4/17 8:00	0.70	0.89	2.94	504131	6966588	0.76	0.97	3.45	445693	6977220	0.84	1.06	3.45	445693	6977220
	25/4/17 9:00	0.73	0.93	3.45	504131	6966588	0.82	1.04	3.45	445693	6977220	0.89	1.13	3.45	445693	6977220
	25/4/17 10:00	0.89	1.13	3.45	504131	6966588	0.98	1.25	3.45	445693	6977220	1.06	1.34	4.05	445693	6977220
	25/4/17 11:00	0.86	1.09	3.45	504131	6966588	0.96	1.21	4.05	445693	6977220	1.04	1.31	4.05	445693	6977220
	25/4/17 12:00	0.87	1.10	3.45	504131	6966588	0.97	1.23	4.05	445693	6977220	1.05	1.33	4.05	445693	6977220
	25/4/17 13:00	0.90	1.14	3.45	504131	6966588	1.00	1.27	4.05	445693	6977220	1.08	1.37	4.05	445693	6977220
	25/4/17 14:00	0.78	0.99	3.45	504131	6966588	0.89	1.13	3.45	445693	6977220	0.98	1.24	3.45	524630	6958705
	25/4/17 15:00	0.60	0.77	2.94	504131	6966588	0.69	0.88	3.45	445693	6977220	0.81	1.03	3.45	524630	6958705
	25/4/17 16:00	0.52	0.67	2.94	504131	6966588	0.60	0.76	3.45	445693	6977220	0.69	0.88	3.45	524630	6958705
	25/4/17 17:00	0.40	0.51	2.50	504131	6966588	0.48	0.60	2.94	445693	6977220	0.55	0.69	3.45	524630	6958705
Cierre	25/4/17 6:00	0.65	0.82	3.45	398461	6984639	0.68	0.86	3.45	398461	6984639	0.69	0.87	3.45	398891	6987557
	25/4/17 7:00	0.82	1.04	3.45	398461	6984639	0.87	1.10	3.45	398461	6984639	0.88	1.12	3.45	398891	6987557
	25/4/17 8:00	0.91	1.16	3.45	398461	6984639	0.97	1.23	4.05	398461	6984639	0.98	1.24	4.05	398891	6987557
	25/4/17 9:00	0.98	1.24	4.05	398461	6984639	1.04	1.32	4.05	398461	6984639	1.04	1.32	4.05	398891	6987557
	25/4/17 10:00	1.19	1.51	4.05	398461	6984639	1.26	1.59	4.05	398461	6984639	1.26	1.60	4.05	398891	6987557
	25/4/17 11:00	1.17	1.49	4.05	398461	6984639	1.23	1.56	4.05	398461	6984639	1.23	1.56	4.05	398891	6987557
	25/4/17 12:00	1.18	1.50	4.05	398461	6984639	1.24	1.57	4.05	398461	6984639	1.23	1.56	4.05	398891	6987557
	25/4/17 13:00	1.21	1.53	4.05	398461	6984639	1.27	1.61	4.05	398461	6984639	1.27	1.61	4.05	398891	6987557
	25/4/17 14:00	1.09	1.39	4.05	398461	6984639	1.15	1.46	4.05	398461	6984639	1.14	1.45	4.05	398891	6987557
	25/4/17 15:00	0.87	1.11	4.05	398461	6984639	0.92	1.16	4.05	398461	6984639	0.90	1.15	4.05	399465	6988394
	25/4/17 16:00	0.75	0.95	3.45	398461	6984639	0.78	1.00	3.45	398461	6984639	0.79	1.00	3.45	399465	6988394
	25/4/17 17:00	0.59	0.75	3.45	398461	6984639	0.62	0.79	3.45	398461	6984639	0.63	0.80	3.45	399465	6988394

5.8 Erosión potencial por oleaje

5.8.1 Metodología de cálculo

Dentro del entorno de lagos y reservorios de agua existen diferentes procesos físicos que pueden influir sobre los mecanismos que conducen a la erosión de márgenes. Entre los más significativos se pueden identificar: la escorrentía superficial, la filtración de aguas subterráneas, el movimiento de masas de hielo, corrientes generadas dentro del lago, y la acción del oleaje.

El manual de protección de costas SPM (Shore Protection Manual, 1984) señala la acción de las olas generadas por el viento como el forzante principal para la configuración geométrica de las zonas de playa en entornos costeros. En este aspecto, se destacan fundamentalmente la orientación de la línea costa, que define las direcciones de incidencia y las distancias de generación de las olas, como también los mecanismos de disipación que controlan la energía con la que el oleaje puede llegar al área costera.

En este estudio se aplica un método desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. (*U.S. Army Corps of Engineers*) para predecir la erosión sobre márgenes caracterizadas por suelos de material cohesivo en reservorios expuestos a la acción de las olas. Este método fue inicialmente desarrollado para su aplicación en el Lago Hartwell, ubicado en los estados de Carolina del Sur y Georgia (EE.UU), y calibrado analizando la evolución histórica de la línea de costa mediante el uso de imágenes aéreas digitalizadas.

La metodología de cálculo, presentada por Elci & Work (2003), permite estimar una tasa de erosión (m/año) para cualquier ubicación puntual sobre la línea de costa a partir de la acción dinámica inducida por el clima de olas, considerando un esquema geométrico simplificado para el perfil de playa.

Los parámetros del oleaje requeridos para la aplicación del método consisten en la altura significativa de ola (H_s) y el periodo de pico (T_p), los cuales pueden ser estimados por el modelo SWAN. Para la caracterización de cada sección de costa sobre la que se realiza el cálculo se requiere información topobatemétrica que permita adecuar el perfil correspondiente al modelo de esquema simplificado presentado en la **Figura 5.17**. Esta simplificación implica la determinación de las pendientes m_1 (pendiente de la playa) y m_2 (pendiente de la barranca), como así también de las alturas Z_{toe} (cota del pie de la barranca) y Z_{bluff} (cota superior de la barranca). El nivel estático del lago se encuentra identificado por Z_{lake} , mientras que X_b representa la distancia desde el punto de rompiente de las olas hasta el pie de la barranca.

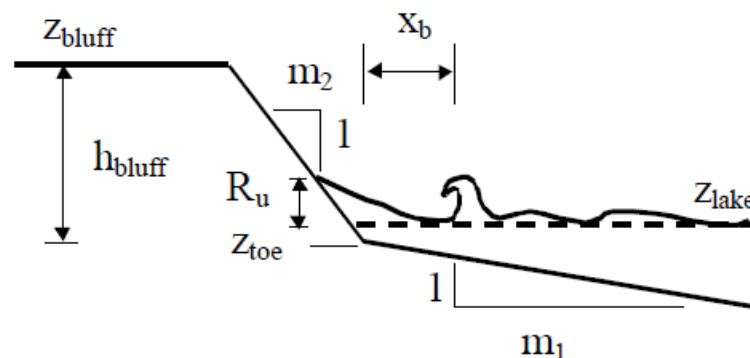


Figura 5.17. Esquema de la geometría simplificada para la sección de cálculo de la erosión

Establecidos los parámetros es posible calcular la trepada de la ola R_u y la relación de humedad o sumergencia λ , utilizando las siguientes expresiones:

$$R_u = 1.24H^{0.5}Tm_1$$

$$\lambda = \frac{(Z_{lake} + R_u - Z_{toe})}{(Z_{bluff} - Z_{toe})}$$

Por otra parte, el poder erosivo del oleaje depende fuertemente del nivel del reservorio, el cual puede modificarse sustancialmente a lo largo del año, tanto por causas naturales asociadas al clima, como por las condicionamientos relacionados con la operación del embalse. En este contexto, el método de cálculo considera tres situaciones diferentes para estimar la tasa de erosión, las se encuentran señaladas en la **Figura 5.18**.

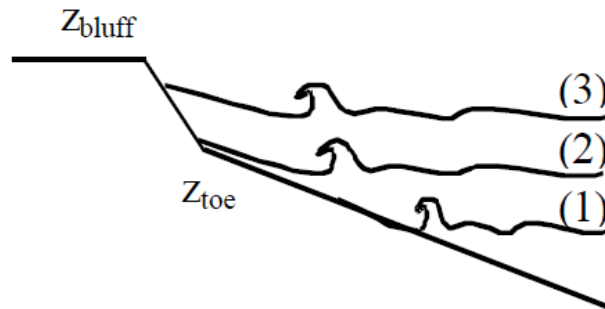


Figura 5.18. Casos considerados para la metodología de predicción de la erosión

Dado este esquema se propone:

1. Si $Z_{lake} + R_u < Z_{toe}$, la sumergencia resulta igual a cero ($\lambda = 0$). La erosibilidad es calculada en términos de exceso de tensión de corte aplicada al suelo. La tasa de recesión R (m/s) se estima mediante la siguiente expresión:

$$R = \left[\left(\frac{A m_1^2 X_b^2}{T^2 \sin^2(k \cdot h)} \right) - B \right] (1 + n\lambda)$$

donde

$$A = \frac{1}{6} M \frac{P}{P_s} f_w k^2 \pi^2; \quad B = \frac{M \tau_c}{P_s}; \quad X_b = \frac{(Z_{toe} - Z_{lake} + h)}{m_1}; \quad h = \frac{H_s}{0.8}$$

$$A = \frac{1}{6} M \frac{P}{P_s} f_w k^2 \pi^2$$

siendo:

- k: número de onda (1/m).
- h: profundidad del agua (m).
- n: efecto erosivo de la trepada de las olas sobre la barranca (=3).
- M: constante (= $9.73 \cdot 10^{-8}$ s/m).
- P: densidad del agua.
- P_s : densidad del sedimento.
- f_w : factor de fricción por olas (= $3.4 \cdot 10^{-3}$).
- k: constante (= 0.78).
- τ_c : tensión de corte crítica (kg/m.s²).

2. Si $Z_{lake} < Z_{toe}$ y $Z_{lake} + R_u > Z_{toe}$: la sumergencia resulta distinta de cero ($\lambda \neq 0$), pero se utilizan las mismas expresiones de cálculo que en caso anterior.
3. Si $Z_{lake} > Z_{toe}$: la erosibilidad se encuentra directamente relacionada con la energía del oleaje y la tasa de recesión para la línea de costa se calcula mediante la expresión:

$$R = \left[\left(\frac{Am_1^2 X_b^2}{T^2 \sin^2(k \cdot h)} \right) - B \right] (1 + n\lambda) \quad B = \frac{M\tau_c}{P_s}$$

$$R = C \lambda H^2 T m_1 m_2$$

donde C es una constante de calibración del método (= 0.00022).

5.8.2 Predicción de erosión potencial

La descripción de las características físicas del área del Lago Hartwell, donde fue desarrollada la metodología presentada, permiten suponer un entorno comparable al del embalse Itatí-Itacorá en cuanto a dimensiones del reservorio, tipo de suelo y cobertura vegetal. En este contexto, resulta aceptable utilizar el método de cálculo presentado en la sección anterior para estimar la magnitud del efecto erosivo que podría generar el oleaje dentro del embalse.

La identificación de los sectores costeros con mayor exposición al efecto de las olas, junto con la disponibilidad de una cantidad limitada de perfiles de costa relevados, permitieron seleccionar 5 secciones de interés para la aplicación del método de predicción de la erosión. Las mismas se encuentran indicadas en la **Figura 5.19**, ubicándose tres sobre la margen izquierda (MI-1, MI-2 y MI-3) y dos sobre la margen derecha del embalse (MD-1 y MD-2).

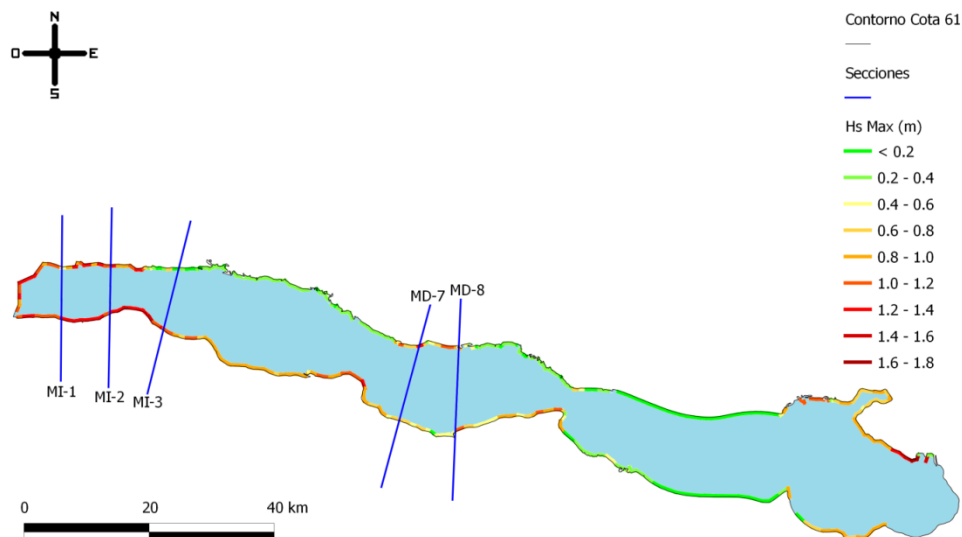


Figura 5.19. Secciones seleccionadas para la predicción de erosión (H_s indicada para $Tr = 100$)

Ahora bien, aunque la información generada a partir del análisis de valores extremos del viento permitió identificar las secciones críticas, la aplicación de la metodología de estimación de la tasa de recesión anual a cada una esas secciones demanda conocer la evolución del oleaje a lo largo del tiempo, de modo de realizar un cómputo acumulado del efecto erosivo. Este tipo

de datos no está disponible para el embalse de Itatí-Itacorá. En consecuencia, se procedió a utilizar datos del oleaje registrado en el olígrafo de la represa de Yacyretá, bajo la hipótesis de que los mismos vientos actuando sobre el embalse Itatí-Itacorá deberían generar un clima de olas similar. Más específicamente, se utilizó información correspondiente a 5 años de registro del oleaje, para los que se cuenta con series temporales completas. En la **Tabla 5.27** se presenta la síntesis de los datos utilizados, indicándose valores correspondientes a promedios anuales de alturas de ola, períodos de pico y longitud de onda obtenidos para cada año.

Tabla 5.27. Características medias del oleaje en Yacyretá

Parámetro de oleaje	Año				
	2005	2006	2014	2015	2016
Promedio Hs (m)	0.20	0.19	0.17	0.15	0.14
Promedio Tp (s)	2.8	2.8	3.2	3.2	3.2
Longitud de onda (m)	7.8	7.8	9.2	9.1	9.1

Las secciones indicadas en la **Figura 5.19** fueron ajustadas al esquema simplificado, a partir de lo cual se estimaron los parámetros geométricos necesarios para el cálculo. A modo de ejemplo, la **Figura 5.20** muestra el grado de aproximación entre el perfil natural del terreno y el modelo simplificado correspondiente a la ubicación MI-2.

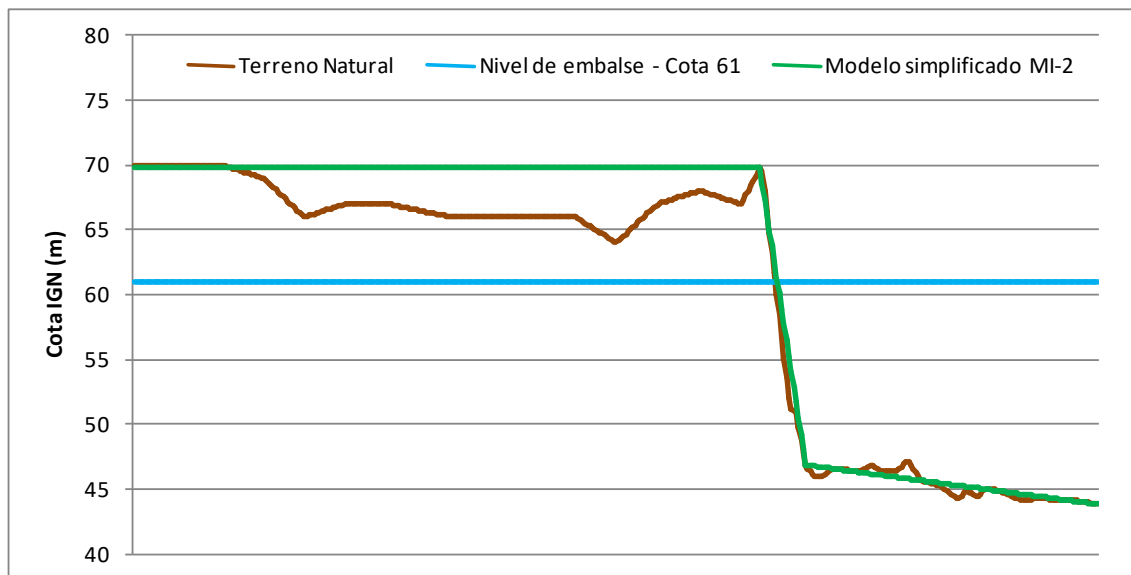


Figura 5.20. Modelo simplificado para la sección MI2

La **Tabla 5.28** muestra los parámetros geométricos (alturas y pendientes) que caracterizan a las secciones seleccionadas para el análisis sobre la margen izquierda. Las tres secciones analizadas presentan un esquema muy similar.

Tabla 5.28. Características geométricas de las secciones analizadas sobre margen izquierda

	Parámetros de la sección				
	Zbluff	Ztoe	hbluff	m ₁	m ₂
Sección MI1	67.0	40.1	26.9	0.0025	0.1413
Sección MI2	69.7	46.9	22.9	0.0025	0.1204
Sección MI3	67.0	46.8	20.2	0.0028	0.0531

En los tres casos, el nivel del lago se encuentra holgadamente por encima del pie de la barranca, por lo cual la tasa de recesión R fue calculada utilizando la expresión correspondiente a la situación 3) de la **Figura 5.18**.

La **Figura 5.21** muestra resultados para el cálculo de R (m/año) que se obtienen considerando diferentes valores hipotéticos de alturas de ola permanente durante todo un año. Estas curvas sirven como un parámetro de referencia que indica el orden de magnitud que podrían alcanzar las tasas de recesión anual para las diferentes secciones, al mismo tiempo que señalan la influencia de los parámetros geométricos sobre los resultados del cálculo.

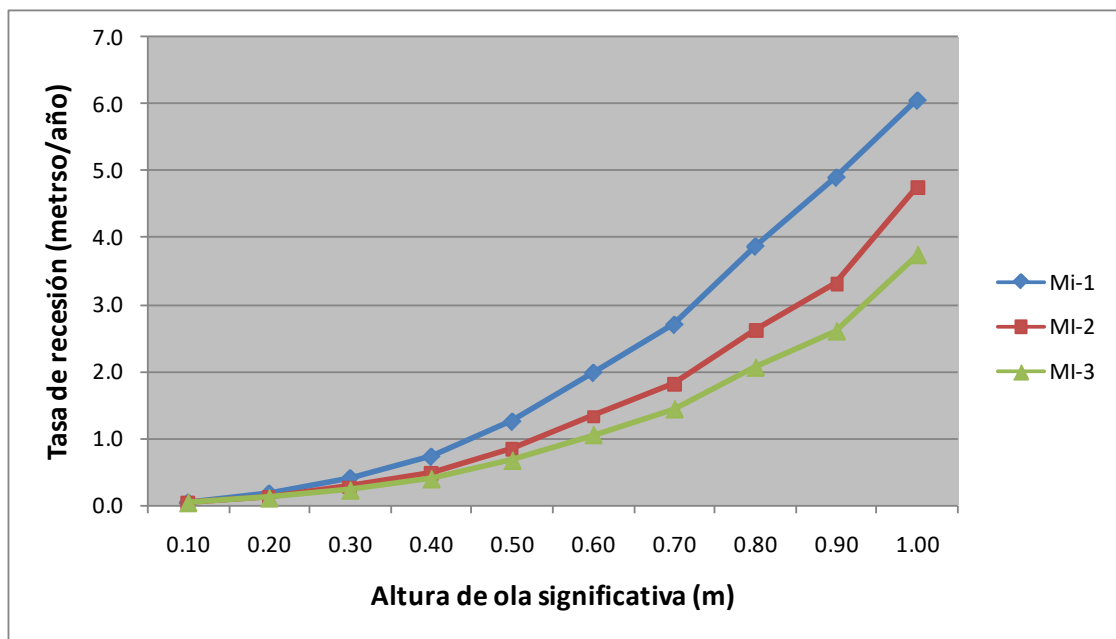


Figura 5.21. Estimación de valores de tasa de recesión R (m/año) de referencia

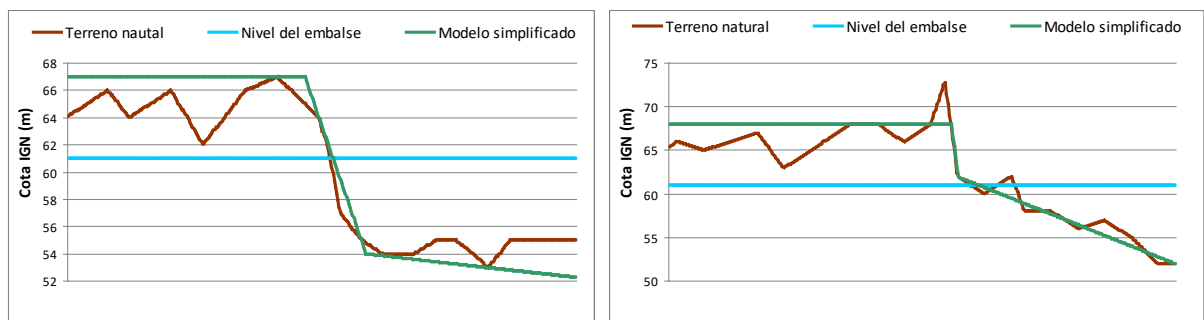
Si se utilizan como base de comparación los valores medios anuales del oleaje registrado en Yacyretá (**Tabla 5.27**), los cuales resultan del orden de $H_s = 0,2$ m, se obtendrían tasas de recesión que no superan los $0,2$ m/año. Utilizando los datos de la serie cronológica del registro de H_s , que contienen información completa para los años indicados, se desarrolló un cálculo más refinado que consideró el efecto acumulado a lo largo de cada período anual. El resultado de este procedimiento de cálculo se presenta en la **Tabla 5.29**.

Tabla 5.29. Valores de tasas de recesión anual sobre margen izquierda

	R (m/año)					Promedio (m/año)
	2005	2006	2014	2015	2016	
Sección MI-1	0.48	0.43	0.57	0.44	0.37	0.46
Sección MI-2	0.32	0.29	0.38	0.30	0.25	0.31
Sección MI-3	0.25	0.23	0.30	0.23	0.20	0.24

Estos resultados constituyen una estimación preliminar sobre la predicción de tasa de recesión anual que podrían esperarse en la zona de la margen derecha del embalse que se presenta como más expuesta a la acción erosiva del oleaje.

El mismo procedimiento de cálculo fue implementado para estimar tasas de recesión anual sobre la margen derecha del embalse. La **Figura 5.22** muestra las diferencias entre las secciones seleccionadas para el cálculo y ajuste entre el perfil natural del terreno y el modelo simplificado.



a) Sección MD-1

b) Sección MD-2

Figura 5.22. Secciones de cálculo sobre margen derecha

La **Tabla 5.30** presenta los parámetros (alturas y pendientes) que surgen de la adopción de los esquemas simplificados para la caracterización geométrica de los perfiles. Resultan evidentes, fundamentalmente, las diferencias entre los valores de las pendientes m_2 .

Tabla 5.30. Características geométricas para las secciones analizadas sobre margen derecha

	Parámetros de la sección				
	Zbluff	Ztoe	hbluff	m_1	m_2
Sección MD-1	67.0	54.0	13.0	0.0010	0.0260
Sección MD-2	68.0	61.9	6.1	0.0071	0.1216

De acuerdo a la posición del nivel del lago respecto del desarrollo de ambos perfiles fue necesario considerar dos expresiones de cálculo diferentes para la estimación de las tasas de recesión R. Haciendo referencia al esquema presentado en la **Figura 5.18**, se utilizaron las expresiones representativas de las situaciones 3) y 1) para el cálculo correspondiente a las secciones MD-1 y MD-2, respectivamente.

Utilizando los datos de la serie cronológica del registro de Hs, se desarrolló el cálculo para la tasa de recesión en ambas secciones considerando el efecto acumulado a lo largo de cada período anual. El resultado de este procedimiento se presenta en la **Tabla 5.31**.

Tabla 5.31. Valores de tasa de recesión anual sobre margen derecha

	R (m/año)					Promedio (m/año)
	2005	2006	2014	2015	2016	
Sección MD-1	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
Sección MD-2	0.43	0.42	0.30	0.33	0.30	0.36

Estos resultados muestran la estimación preliminar sobre la predicción de tasa de recesión anual que podrían esperarse en la zona de la margen izquierda del embalse. Los valores correspondientes a la sección MD-2 resultan comparables con los obtenidos para la margen derecha, mientras que los que corresponden a MD-1 muestran tasas de recesión sustancialmente menores.

5.8.3 Evaluación del modelo de erosión

La búsqueda de antecedentes en la región referidos al estudio de erosión costera en embalses debido acción del oleaje, presenta como caso de interés las evaluaciones realizadas en la represa de Itaipú.

Los trabajos desarrollados en dicho embalse consistieron en la identificación de sitios degradados, a través de un sobrevuelo por toda la costa de la margen derecha, de recorridos por agua y tierra y del levantamiento topográfico de los mismos. También incluye el análisis de datos obtenidos en el relevamiento, y de información técnica de interés tales como la magnitud de la erosión, tipos de suelos afectados, infraestructura dañada. Los resultados de estos estudios se presentan en el Informe realizado por F. R. Ramírez Cantero.

Según el Programa de Mediciones de Erosión Costera, Embalse Itaipú-MD, se cuenta con 14 estaciones de medición de erosión, ubicadas a lo largo de la costa de la margen derecha. Las mismas fueron instaladas entre los meses de octubre de 1994 y octubre de 1996. Se realizaron entre 9 y 23 mediciones para cada estación. La ubicación general de los sitios relevados se presenta en la **Figura 5.23**.

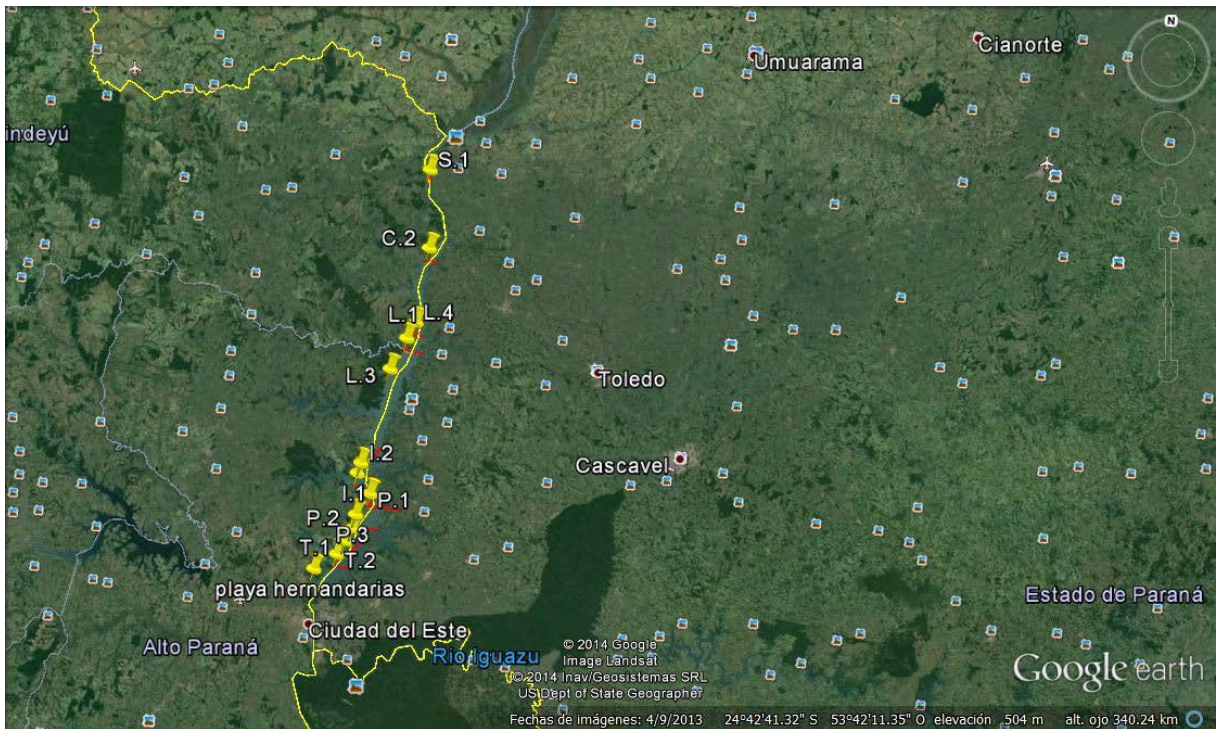


Figura 5.23. Ubicación general de los sitios relevados

Los resultados de las evaluaciones indican que la erosión costera tuvo un máximo de 2,33 m/año en la estación de T.2, ubicada en la zona del río Pirapytá, y un mínimo de 0,51 m/año en la estación S.1, ubicada en la zona Tacuarí. La **Tabla 5.32** presenta la síntesis con los resultados obtenidos para la totalidad de los relevamientos realizados. Estos tienen un orden de magnitud equiparable con los valores estimados para el embalse de Itatí mediante la aplicación del método de Elci & Work (2003), presentados en el Primer Informe Parcial.

Tabla 5.32. Resultados Programa de Mediciones de Erosión Costera. Embalse Itaipú-MD

PUESTO MEDIC.		Fecha	Ubicación Geográfica		Total Ero.	Prom.	Altura	Volumen
Viento incid.		Insta-			Costera /	E.Cost.	Barran-	E.Cost.p
Nivel E.Cost.		lación			Tiempo	p/año	co	/mt.
								de Costa
T.1	Mts.	0	Latitud Sur	25°18,280'	20,26	0,92	3,30	3,036
Sur Este	Fecha	Febr/95	Longitud Oeste	54°31,509'	230 meses	mts./año	-	m3/ año
Nivel IV	Meses	0			18 años 7 meses			
T.2	Mts.	0	Latitud Sur	25°20,680'	39,71	2,33	3,20	7,456
Nor Este	Fecha	Jul/96	Longitud Oeste	54°33,007'	205 meses	mts./año	-	m3/ año
Nivel V	Meses	0			16 años 6 meses			
P.1	Mts.	0	Latitud Sur	25°09,729'	27,97 mts.	1,47	2,95	4,336
S.S.E.	Fecha	Febr/95	Longitud Oeste	54°27,341'	203 meses	mts./año	-	m3/ año
Nivel V	Meses	-			17 años 5 meses			
P.2	Mts.	0	Latitud Sur	25°16,676'	24,03 mts.	1,41	3,00	4,230
E.N.E.	Fecha	Jul/96	Longitud Oeste	54°30,215'	218 meses	mts./año	-	m3/ año
Nivel III	Meses	0			17 años 11 meses			
P.3	Mts.	0	Latitud Sur	25°13,545'	22,54	1,61	3,60	5,769
Nor Este	Fecha	Oct/96	Longitud Oeste	54°29,830'	212 meses	mts./año	-	m3/ año
Nivel V	Meses	0			17 años 4 meses			
I.1	Mts.	0	Latitud Sur	25°06,298'	31,93 mts.	1,95	3,10	6,045
Nor Este	Fecha	Abr/95	Longitud Oeste	54°30,062'	194 meses	mts./año	-	m3/ año
Nivel V	Meses	0			(16 años 4 meses)			
I.2	Mts.	0	Latitud Sur	25°04,474'	26,57 mts.	1,15	3,30	3,810
E.N.E.	Fecha	Jul/95	Longitud Oeste	54°29,473'	213 meses	mts./año	-	m3/ año
Nivel V	Meses	0			(18 años 9 meses)			

Tabla 5.32 (Cont.) Resultados Programa de Mediciones de Erosión Costera. Embalse Itaipú-MD

L.1	Mts.	0	Latitud Sur	24°42,153'	30,28 mts.	1,37	1,90	2,615
E.N.E.	Fecha	Oct/94	Longitud Oeste	54°22,275'	217 meses (17 años 8 mes)	mts./año	-	m3/ año
Nivel III	Meses	0						
L.2	Mts.	0	Latitud Sur		16,36 mts.	2,25	2,14	4,815
Sur	Fecha	Oct/94	Longitud Oeste		95 meses (7 años 1 mes)	mts./año	-	m3/ año
Nivel IV	Meses	0						
L.3	Mts.	0	Latitud Sur	24°47,714'	20,60 mts.	0,89	3,35	2,980
E.N.E.	Fecha	May/95	Longitud Oeste	54°25,066'	221 meses (18 años 7 meses)	mts./año	-	m3/ año
Nivel IV	Meses	0						
L.4	Mts.	0	Latitud Sur	24°39,280'	17,87 mts.	0,89	1,90	1,697
Nor Este	Fecha	Oct/95	Longitud Oeste	54°20,744'	212 meses (18 años 2 mes)	mts./año	-	m3/ año
Nivel III	Meses	0						
C.1	Mts.	0	Latitud Sur		8,18 mts.	1,56	3,23	5,039
Este	Fecha	nov-95	Longitud Oeste		63 meses (5 años 3 meses)	mts./año	-	m3/ año
Nivel IV	Meses	0						
C.2	Mts.	0	Latitud Sur	24°26,146'	20,0 mts.	1,11	2,53	2,811
Nor Este	Fecha	Nov/95	Longitud Oeste	54°19,167'	213 meses (18 años 0 meses)	mts./año	-	m3/ año
Nivel III	Meses	0						
S.1	Mts.	0	Latitud Sur	24°12,433'	10,27 mts.	0,51	0,70	0,359
Nor Este	Fecha	Jun/95	Longitud Oeste	54°20,088'	188 meses (18 años 5 meses)	mts./año	mts./año	m3/ año
Nivel II	Meses	0						
							m3/m año	54,998

Datos disponibles en el informe de Ramirez Cantero permiten recopilar la información necesaria para aplicar el método de Elci & Work en una ubicación puntual del embalse de Itaipú: Ivytyrokai.

La sección indicada fue ajustada al esquema simplificado, a partir del cual se estimaron los parámetros geométricos necesarios para el cálculo. La **Figura 5.24** muestra el grado de aproximación entre el perfil natural del terreno y el modelo simplificado correspondiente a la ubicación de Ivytyrokai.

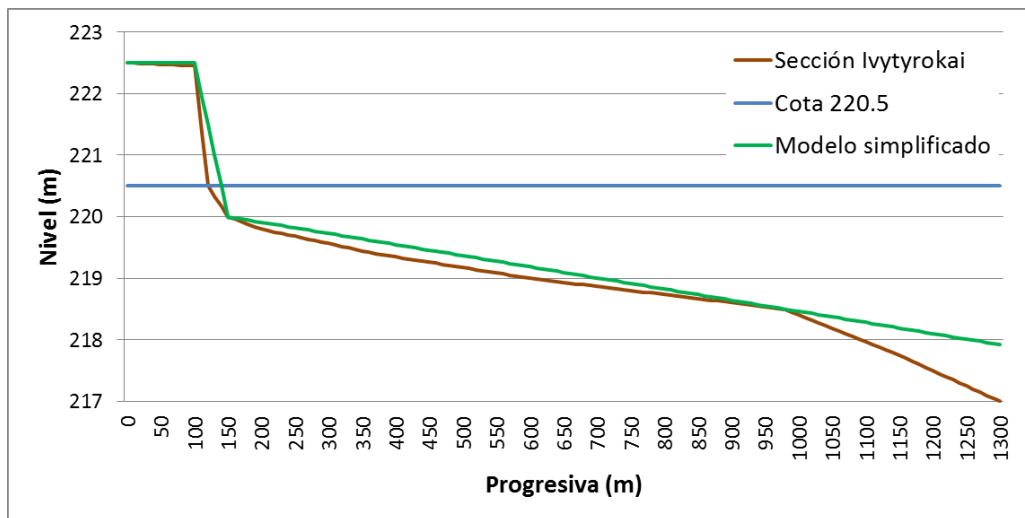


Figura 5.24. Modelo simplificado para la sección

En la **Tabla 5.33** se indican los parámetros geométricos (alturas y pendientes) que caracterizan a la sección seleccionada para el análisis.

Tabla 5.33. Características geométricas de la sección Ivityrokai.

Parámetros de la sección				
Zbluff	Ztoe	hbluff	m ₁	m ₂
222.5	220.0	2.5	0.0500	0.0018

La **Tabla 5.34** muestra resultados para el cálculo de R (m/año), que se obtienen considerando diferentes valores hipotéticos de alturas de ola permanente durante todo un año. Estos valores de referencia indican el orden de magnitud que podrían alcanzar las tasas de recesión anual para la sección evaluada.

El resultado de la aplicación del método para estimar la erosión muestra un acercamiento razonable con los valores obtenidos mediante el análisis de los datos surgidos del relevamiento de campo. En efecto, para la sección de Ivityrokai los datos de oleaje (según Ramírez) indican una altura de $H_s = 1,05$ y $T_p = 3,25$ s, con lo que aplicando Elci & Work se obtendría una erosión media anual de $R = 1,08$ m (**Tabla 5.34**). La estación relevada más cercana a esta ubicación es la P1, donde los datos de campo indicaron una erosión media anual de $R = 1,47$ m.

Tabla 5.34. Resultado de la aplicación del método de Elci y Work en Ivytyrokai

H (m)	T (s)	C	λ	Ru	R (m/año)
0.49	2.10	0.00022	0.436	0.091	0.138
0.77	2.87	0.00022	0.462	0.156	0.493
0.78	2.87	0.00022	0.463	0.157	0.507
0.87	3.30	0.00022	0.476	0.191	0.746
0.90	4.10	0.00022	0.496	0.241	1.034
0.95	3.30	0.00022	0.480	0.199	0.896
0.98	3.30	0.00022	0.481	0.203	0.956
0.99	3.60	0.00022	0.489	0.222	1.081
1.05	3.25	0.00022	0.483	0.206	1.084
1.06	3.35	0.00022	0.486	0.214	1.146
1.14	3.75	0.00022	0.499	0.248	1.526
1.18	3.65	0.00022	0.498	0.246	1.588
1.30	3.75	0.00022	0.506	0.265	2.011
1.32	4.10	0.00022	0.517	0.292	2.315
1.35	4.35	0.00022	0.525	0.313	2.611
1.45	3.20	0.00022	0.496	0.239	2.090

6 APOORTE HIDROLÓGICO

6.1 Consideraciones generales

La región de estudio corresponde al tramo del río Paraná que va desde el embalse de Yacyretá hasta el cierre del Proyecto Itatí - ItaCorá. En la **Figura 6.1** se visualiza el área de aporte hidrológico, bastante más significativo sobre la margen derecha (Paraguay) que sobre la izquierda (Argentina).

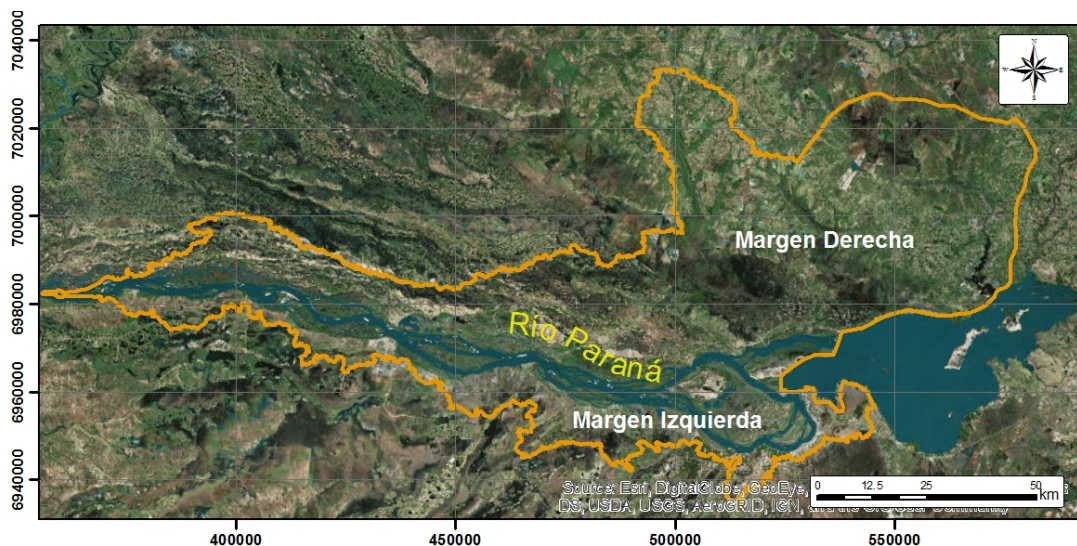


Figura 6.1. Área de aporte.

Para estimar el aporte hidrológico a la zona del embalse de Itatí – ItaCorá se llevó a cabo la modelación hidrológica de las cuencas de margen izquierda (Argentina) y margen derecha (Paraguay), es decir, se representaron los diferentes procesos involucrados en la distribución del agua de lluvia, de modo de generar los caudales que descargan desde las cuencas hacia ambas márgenes al río Paraná.

6.2 Modelación hidrológica

6.2.1 Software

La modelación hidrológica se implementó utilizando el software HEC-HMS⁴, desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE). Este software está diseñado para simular el proceso hidrológico completo de sistemas dendríticos. Incluye procedimientos de análisis hidrológicos tradicionales, tales como infiltración por eventos, hidrograma unitario y traslado hidrológico. También contiene procedimientos para simulación continua, incluyendo evapotranspiración, fusión de nieve, y control de humedad del suelo.

6.2.2 Implementación

La modelación hidrológica se ha encarado a través de la simulación de eventos, representándose pequeños períodos (del orden del día) con eventos de precipitación aislados. Su énfasis está en la filtración y el escurrimiento de superficie, sin tener en cuenta la recuperación de humedad entre eventos de tormenta. A su vez, la modelación es agregada, es decir, los parámetros son uniformes dentro de la cuenca y permanecen constantes a lo largo de un evento, considerándose además que la lluvia es uniforme sobre cada subcuenca.

A partir de esta modelación se obtiene la respuesta del sistema ante un evento de precipitación, es decir, los hidrogramas asociados. Para ello es necesario disponer de las características de la precipitación y de la cuenca. El software HEC-HMS contiene distintas metodologías de cálculo. Se seleccionaron el método de pérdida de la Curva Número (CN) del *Soil Conservation Service* (SCS), y el método de transformación de precipitación en esorrentía del Hidrograma Unitario (UH) del SCS. La tormenta de diseño se representó a través del método de Bloque Alterno.

Para el preprocesamiento de los datos se ha utilizado el software HEC-GeoHMS⁵. Es una extensión de ArcGIS⁶ que contiene una serie de procedimientos, herramientas y utilidades para la preparación de los datos desde un sistema de información geográfica. Esto permite visualizar y realizar análisis espaciales, obtener las características de la cuenca, delinear cauces y cuencas, y finalmente construir las entradas para el HEC-HMS.

6.2.3 Características de las subcuencas

Para delinear las subcuencas y los cauces se preprocesó el MDE, mediante el HEC-GeoHMS, de manera tal de eliminar depresiones en el terreno (relleno de vacíos). Este procesamiento se efectúa rellenando las depresiones mediante el incremento de las cotas de las celdas que estén rodeadas completamente por celdas con mayor cota, asignándole a dicha celda la menor cota de las celdas circundantes. De esta forma el agua puede circular de una celda a otra sin estancarse. Se obtuvo así el MDE “hidrológicamente corregido”.

⁴ <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

⁵ <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/>

⁶ <http://www.esri.com/software/arcgis>

Luego se aplicaron diferentes rutinas al MDE hidrológicamente corregido. La primera provee las “direcciones de flujo”, es decir, las direcciones de máxima pendiente, analizando celda a celda las cotas de las celdas circundantes. La siguiente rutina consiste en la “acumulación del flujo”, donde se determina el número de celdas de aguas arriba que drenan a cada una de las celdas inmediatamente aguas abajo de ella. La acumulación de flujo es una medida del área de drenaje, expresada en unidades de celdas. Posteriormente se realiza la “definición y segmentación de cauces”; en este paso se califica como pertenecientes al cauce a aquellas celdas con flujo procedente de una cantidad de celdas mayor a un umbral definido por el usuario. Todas las celdas que tengan un valor superior al valor umbral serán clasificadas como celdas que forman parte del cauce, mientras que las restantes celdas serán consideradas como superficie del terreno que drena hacia los cauces definidos. Cuanto menor sea el umbral, mayor será el número de cauces generados. Finalmente se realiza la “delineación de subcuencas”, que define una subcuenca por cada segmento de cauce.

Una vez definidas las subcuencas, HEC-GeoHMS posibilita el cálculo de características topográficas de los cauces y subcuencas. Estas características son útiles para comparar subcuencas entre sí y estimar parámetros hidrológicos. Las características físicas de las subcuencas y los cauces se almacenan en tabla de atributos.

6.2.4 Tormenta de diseño

Una tormenta de diseño es un patrón de precipitación definido para utilizarse en el diseño de un sistema hidrológico. La tormenta de diseño conforma la entrada al sistema, y los caudales resultantes a través de éste se calculan utilizando procedimientos de lluvia-escorrentía y tránsito de caudales. La tormenta de diseño puede definirse mediante un hietograma, que especifica la distribución temporal de la precipitación durante la tormenta.

El método del bloque alterno es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva IDF. El hietograma de diseño producido por este método especifica la profundidad de precipitación en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt , sobre una duración total $T_d = n \cdot \Delta t$. Después de seleccionar el periodo de retorno de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF para cada una de las duraciones, y la profundidad de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración. Tomando diferencias entre valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo Δt . Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida T_d , y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño.

6.2.5 Método de Pérdidas

Para el cálculo de las pérdidas se utilizó el método del SCS. Este método estima el exceso de precipitación o escorrentía directa como una función de la precipitación acumulada, cobertura vegetal, uso del suelo y humedad antecedente utilizando la siguiente ecuación:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

donde P_e es la escorrentía directa al tiempo t , P es la profundidad de precipitación al tiempo t , I_a es la abstracción inicial y S la retención potencial máxima.

Del análisis de resultados para cuencas experimentales pequeñas se desarrolló una relación empírica entre S e I_a :

$$I_a = 0.2S$$

resultando de esta manera:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

La retención potencial máxima S y las características de la cuenca están relacionadas a través un número adimensional, comprendido entre 0 y 100, denominado Curva Número (CN). El valor $CN = 100$ es utilizado para superficies impermeables y superficies de agua, y aproximadamente un valor $CN = 30$ es utilizado para suelos permeables con alta tasa de infiltración. La relación entre S y CN se muestra en la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN}$$

Se definen cuatro grupos de suelos desde el punto de vista de su comportamiento hidrológico (NRCS, 2002).

- Grupo A: Suelos con bajo potencial de escurrimiento por su gran permeabilidad y con elevada capacidad de infiltración, aun cuando estén húmedos. Se trata principalmente de suelos profundos y con texturas gruesas (arenosa o areno-limosas).
- Grupo B: Suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados. Principalmente consisten en suelos de mediana a alta profundidad, con buen drenaje. Sus texturas van de moderadamente finas a moderadamente gruesas (franca, franco-arenosa o arenosa).
- Grupo C: Suelos con escasa capacidad de infiltración una vez saturados. Su textura va de moderadamente fina a fina (franco-arcillosa o arcillosa). También se incluyen aquí suelos que presenten horizontes someros bastante impermeables.
- Grupo D: Suelos muy arcillosos con elevado potencial de escurrimiento y, por lo tanto, con muy baja capacidad de infiltración cuando están saturados. También se incluyen aquí los suelos que presentan una capa de arcilla somera y muy impermeable así como suelos jóvenes de escaso espesor sobre una roca impermeable, ciertos suelos salinos y suelos con nivel freático alto.

Los valores de CN para los diferentes tipos de suelo y usos de tierra se encuentran tabulados en el Reporte Técnico 55 del Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos (TR-55, 1986).

6.2.6 Método de transformación Precipitación - Escorrentía

Para la transformación de precipitación en exceso a escorrentía se utiliza el modelo del hidrograma unitario del SCS. Este método consiste en estimar un hidrograma triangular unitario sintético, a partir de las características físicas de la cuenca y un perfil de precipitación efectiva. En base a la revisión de gran número de hidrogramas unitarios, el SCS sugiere la siguiente relación:

$$q_p = 2.08 \frac{A}{T_p}$$

siendo q_p el caudal pico en m^3/s por cm de lluvia efectiva, T_p el tiempo de ocurrencia del pico del hidrograma unitario triangular en horas, y A el área de drenaje en km^2 .

El estudio de hidrogramas unitarios de muchas cuencas rurales indica que el tiempo de retardo $t_{lag} = 0.6 T_c$, donde T_c es el tiempo de concentración de la cuenca. El tiempo de ocurrencia del pico T_p puede expresarse en términos del tiempo de retardo t_{lag} y el tiempo de la duración de la lluvia efectiva:

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_{lag}$$

El tiempo de concentración T_c , también conocido como tiempo de equilibrio de la cuenca, es un parámetro necesario para la determinación del caudal. El tiempo de concentración de una cuenca se encuentra en función de la pendiente media, la longitud del cauce, la forma de la cuenca, la cobertura del suelo, y en menor escala de otros parámetros fisiográficos. Para este estudio se utilizó la ecuación del DNOS, la cual es citada en el Manual de Hidrología Básica para Estructuras de Drenaje (DNIT, 2005):

$$T_c = \frac{10}{k} \cdot \frac{A^{0.3} \cdot L^{0.2}}{I^{0.4}}$$

donde:

T_c = Tiempo de concentración [min]

A = Área de la cuenca [ha]

L = Longitud del cauce principal [m]

I = Pendiente [%]

k = Coeficiente que depende de las características de la Cuenca (**Tabla 6.1**)

Tabla 6.1. Valores de *k* de acuerdo a las características de la cuenca (DNIT, 2005).

<i>k</i>	Características del terreno
2.0	Terreno areno arcilloso, mucha vegetación, mucha absorción
3.0	Terreno común, cubierto de vegetación, absorción apreciable
4.0	Terreno arcilloso, cubierto de vegetación, absorción media
4.5	Terreno arcilloso, vegetación media, poca absorción
5.0	Terreno con roca, escasa vegetación, baja absorción
5.5	Terreno rocoso, vegetación baja, muy poca absorción

6.3 Margen paraguaya

6.3.1 Subcuencas

La simulación hidrológica intenta representar la capacidad de generación de escorrentía de las cuencas en función a sus características geomorfológicas, tipo de suelo, uso de suelo y otras variables hidro-meteorológicas tales como el régimen de precipitación. La zona en donde se ubican las cuencas incrementales al futuro embalse de Itatí – ItaCorá presenta características muy particulares, a saber: bajas pendientes, extensos campos de cultivo de arroz, canalizaciones y humedales. Esto dificulta la utilización de herramientas convencionales para la delimitación de cuencas, puesto que no se trata de una cuenca dendrítica y, además, en algunos casos las canalizaciones existentes alteran el patrón natural de escurrimiento.

Teniendo en cuenta estas circunstancias, la delimitación de cuencas de aporte se llevó a cabo en dos pasos. En primera instancia se utilizó una metodología automática, y en segunda instancia se efectuaron ajustes significativos en forma manual teniendo en cuenta las canalizaciones existentes en campos de arroz, los humedales, y otros factores que inciden en las áreas de aporte.

En la Margen Derecha (**Figura 6.2**) los aportes principales de escurrimiento al embalse de Itatí – ItaCorá son el Arroyo Aguapey (zona MD V), el Arroyo Atinguy (zona MD IV), el Arroyo Jaguarú (zona MD III) y el Arroyo Yabebyry (zona MD II), cuyas cuencas poseen superficies significativas, con variabilidad en el tipo y uso de suelo, y un componente de tránsito hidrológico que requiere una división en subcuencas de menor superficie. Adicionalmente, en el sector oeste se desarrollan varias cuencas de llanura de menor superficie, las cuales se han agrupado como zona MD I.

En la **Figura 6.3** se muestra cada una de las zonas de aporte divididas en subcuencas.

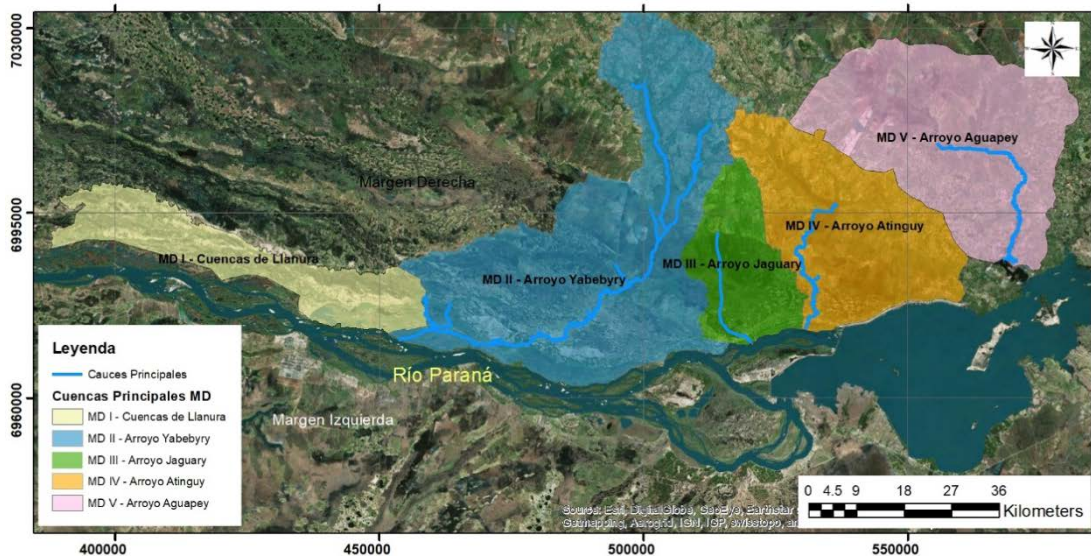


Figura 6.2. Zonas de aporte de la Margen Derecha.

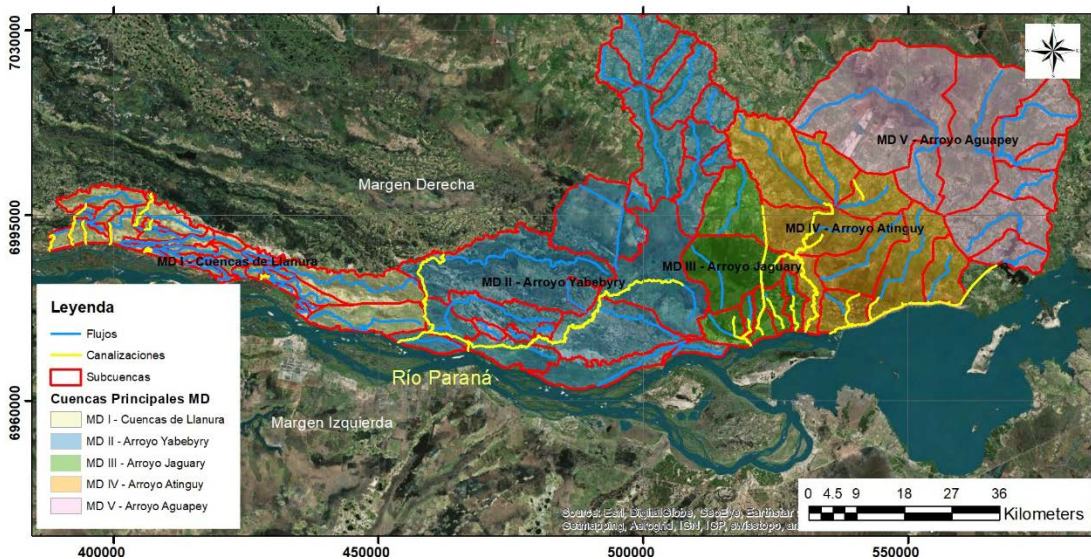


Figura 6.3. Subcuencas de aporte de la Margen Derecha.

En el Anexo se presentan los esquemas de modelación para cada zona de aporte, extraídos directamente del HEC-HMS.

El Arroyo Yabebyry se encuentra bien definido en la zona alta, pero el cauce se vuelve intermitente en la zona media. En este sector el agua del arroyo se desborda en épocas de crecida, alimentando una serie de bañados antes de continuar hacia aguas abajo. Este hecho retarda considerablemente la ocurrencia del pico de inundación, dado el tiempo que transcurre hasta llenar los bañados. Adicionalmente, conduce a la atenuación del caudal pico. Para representar este efecto de laminación se incorporó al modelo un reservorio representativo del volumen de almacenamiento disponible.

En la **Figura 6.4** se muestra una imagen donde se resaltan en líneas azules los cauces principales, y se indica en sombreado azul-verdoso la extensión aproximada del área de bañados que es regada por el arroyo. Esta área se delimitó en base a una inspección visual de la imagen satelital, considerando la extensión de suelos saturados y las características geomorfológicas del área, que permiten delimitar las zonas bajas inundables.

Para modelar el efecto de este bañado se seleccionó como elemento del HEC-HMS un reservorio lineal, el cual requiere para su caracterización dos relaciones o curvas: i) Altura-Área y ii) Altura-Descarga. La primera relación se construyó en base a las siguientes estimaciones:

- Se midió el área “superficie máxima inundable” de la **Figura 6.4**. Se asumió un nivel de agua máximo de 2 metros.
- Se estimó otro polígono de menor superficie correspondiente a la altura cero de la planicie de inundación o altura de banca llena.

Los valores resultantes se muestran en la **Tabla 6.2**.

Tabla 6.2. Relación Elevación-Área utilizada en la simulación del reservorio.

Elevación (m)	Área (1000m ²)
0	91951
2	114939

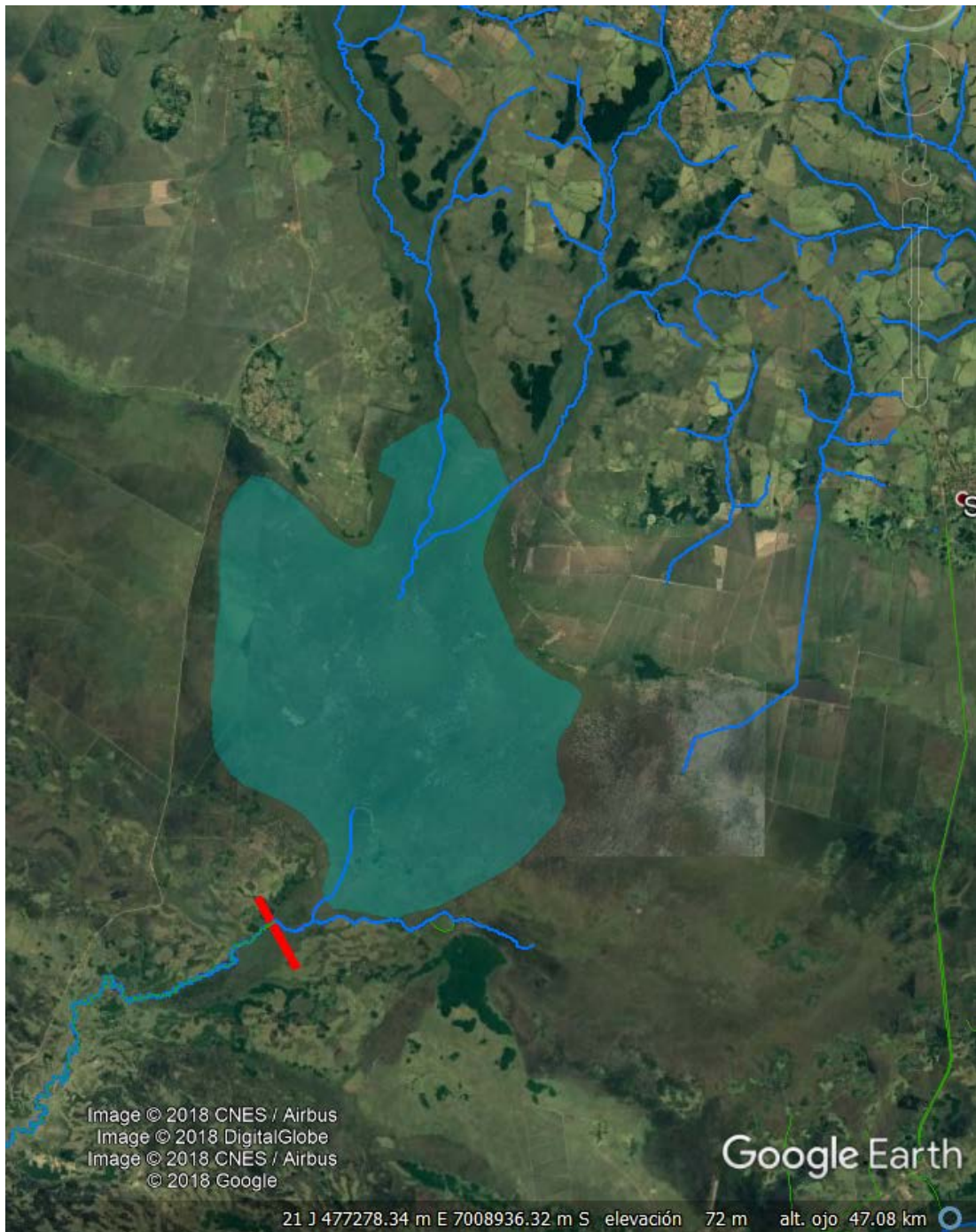


Figura 6.4. Cauces y zona de bañados del Arroyo Yabebyry. El polígono azul-verdoso muestra la extensión aproximada del bañado, y la línea roja indica la sección transversal utilizada para estimar la relación altura-descarga.

La relación Altura-Descarga se obtuvo asumiendo que la descarga del reservorio se produce siguiendo la ley de Manning, que implica una relación unívoca entre la altura y el caudal, y que aguas abajo se alcanza la altura normal. La línea roja de la **Figura 6.5** muestra el sitio donde se estimaron los datos geométricos para la sección, a partir de la cual se generaron niveles asociados a cada caudal. Esta relación se muestra en la **Tabla 6.3**.

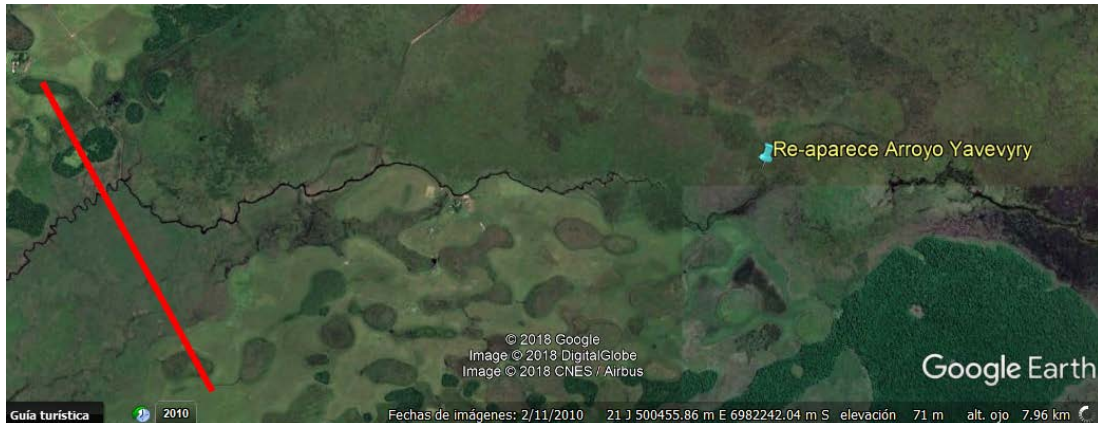


Figura 6.5. El Arroyo Yabebyry se vuelve a identificar con un cauce definido, luego de la zona de bañados.

Tabla 6.3. Relación Elevación-Descarga utilizada en la simulación del reservorio.

Elevación (m)	Descarga (m ³ /s)
0.0	0
0.5	100
0.7	200
0.9	300
1.0	400
1.1	500
1.2	600
1.3	700
1.4	800
1.5	900
1.6	1000

6.3.2 Precipitación

Se pueden generar precipitaciones sintéticas en base a las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) generadas por Cuevas & Rolón (2010), sin embargo, estas tienen la limitación de que solamente son válidas hasta eventos de 3 horas (180 minutos) de duración (**Figura 6.6** y **Figura 6.7**).

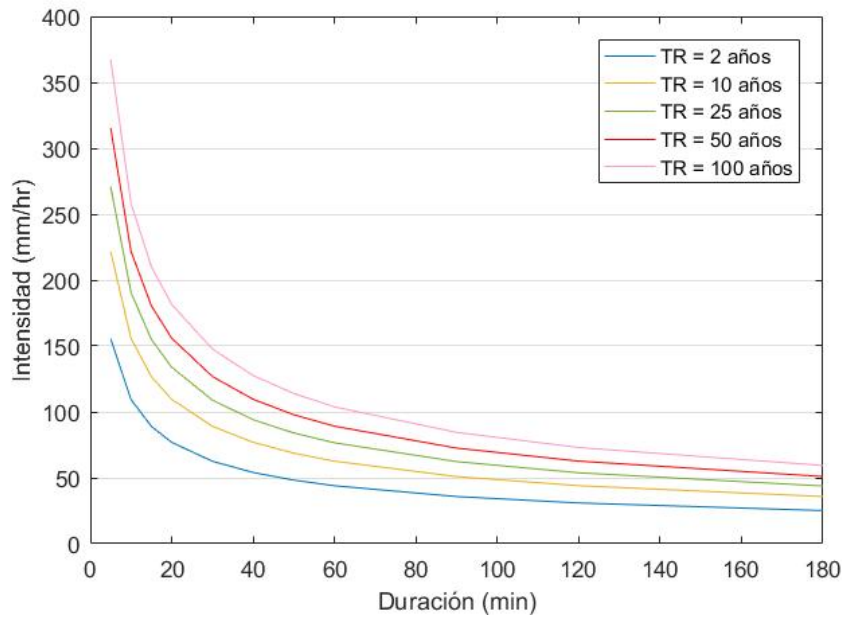


Figura 6.6. Curvas IDF de la Estación Encarnación.

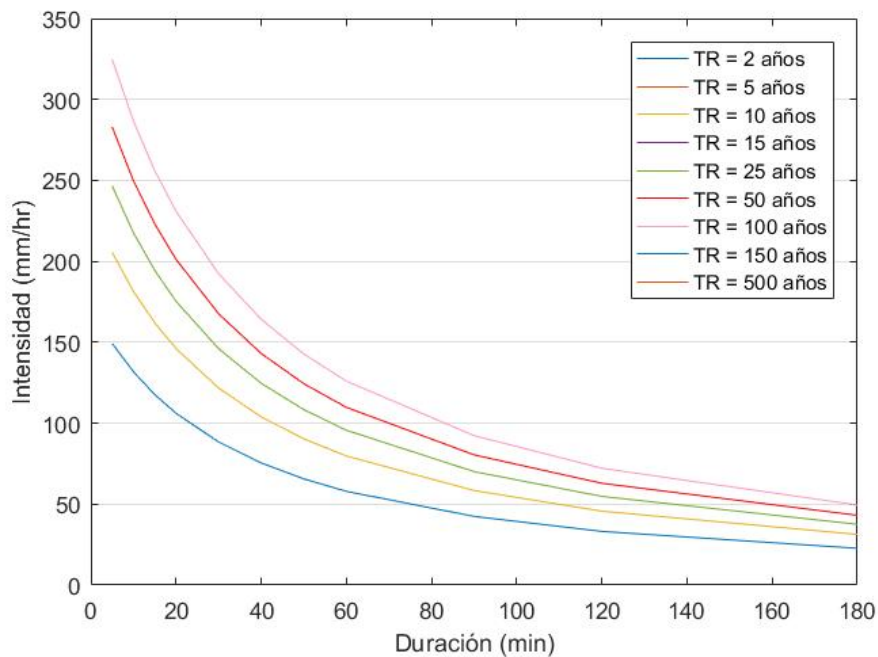


Figura 6.7. Curvas IDF de la Estación Pilar.

Dadas las dimensiones de las cuencas bajo estudio, se requiere trabajar con tormentas de duración superior a 3 horas. Entonces, se procedió a determinar valores de intensidad de precipitación para una tormenta de 24 horas de duración en las estaciones de Encarnación y Pilar a partir de las series temporales disponibles de paso diario (Figura 6.8 y Figura 6.9, respectivamente). Para el efecto, se aplicó la distribución teórica de máximos de GÜMBEL, obteniéndose la precipitación máxima diaria en mm/día para distintos periodos de retorno en cada estación (Figura 6.10 y Figura 6.11). Los resultados se presentan en la **Tabla 6.4**.

Los valores de intensidad correspondientes a 6 y 12 horas se obtuvieron mediante interpolación. A modo de ejemplo, en la **Figura 6.12** se muestra este procedimiento para un periodo de recurrencia de 2 años.

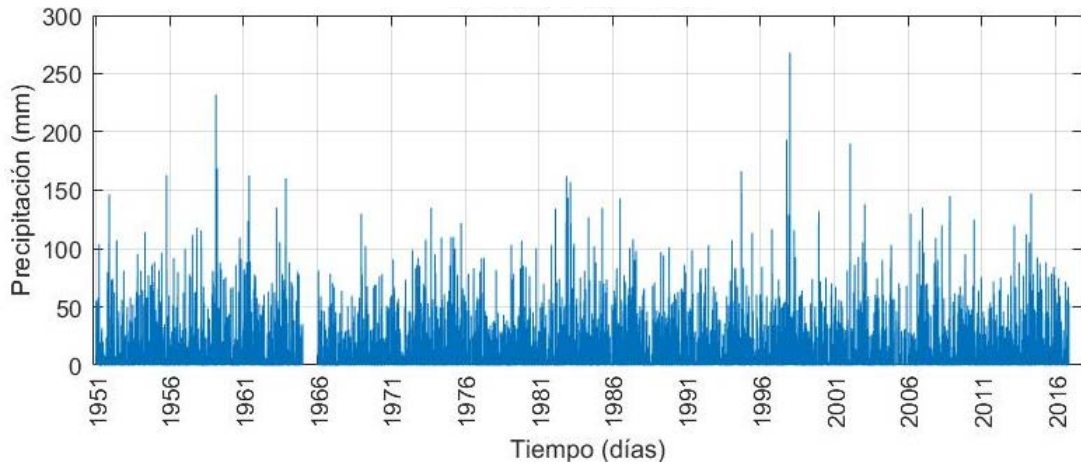


Figura 6.8. Serie de precipitación de la Estación Encarnación. Periodo: 1951 – 2016.

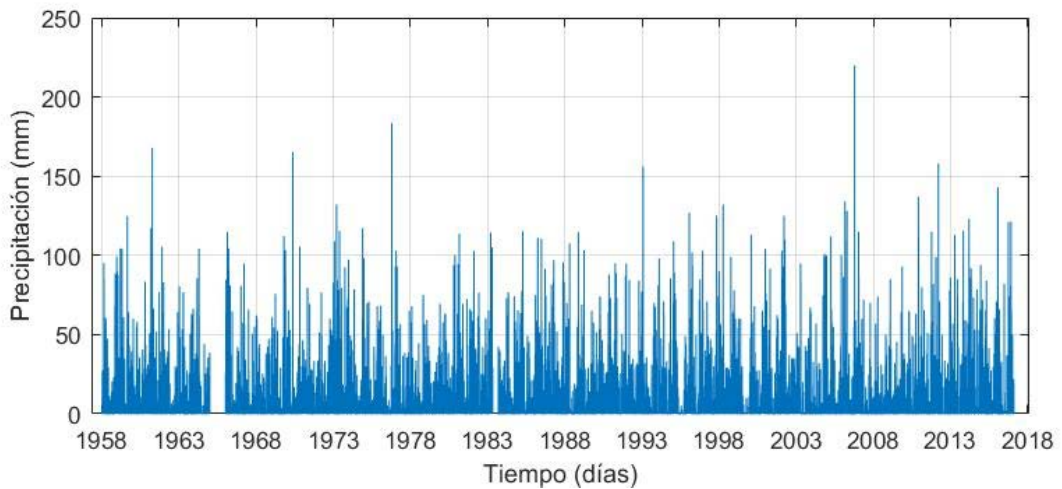


Figura 6.9. Serie de precipitación de la Estación Pilar. Periodo: 1958 – 2017.

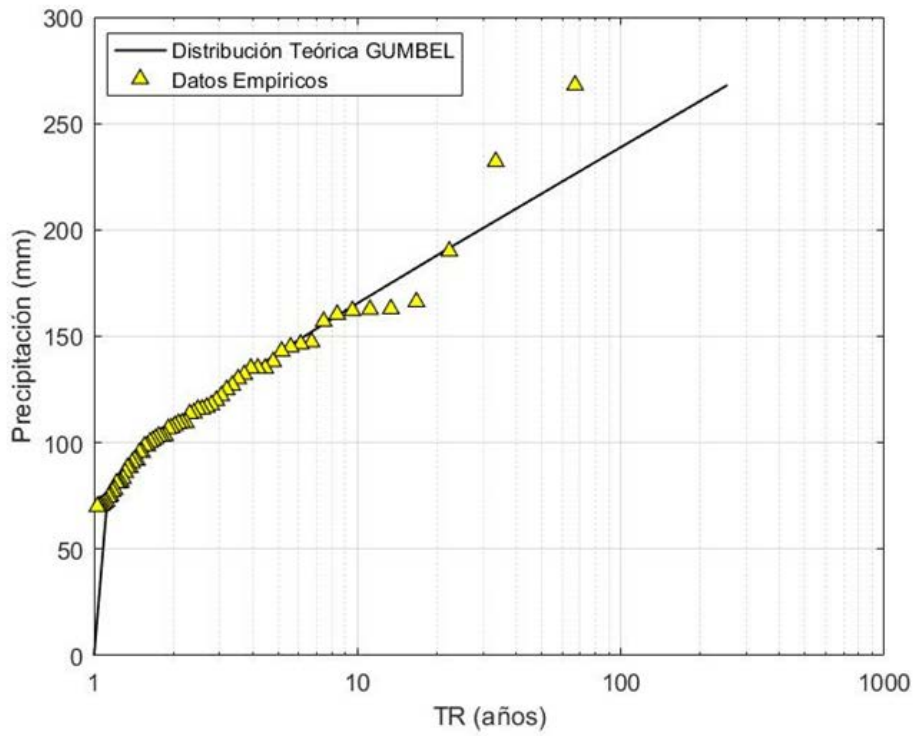


Figura 6.10. Distribución Teórica de Precipitación (GÜMBEL) para la Estación de Encarnación.

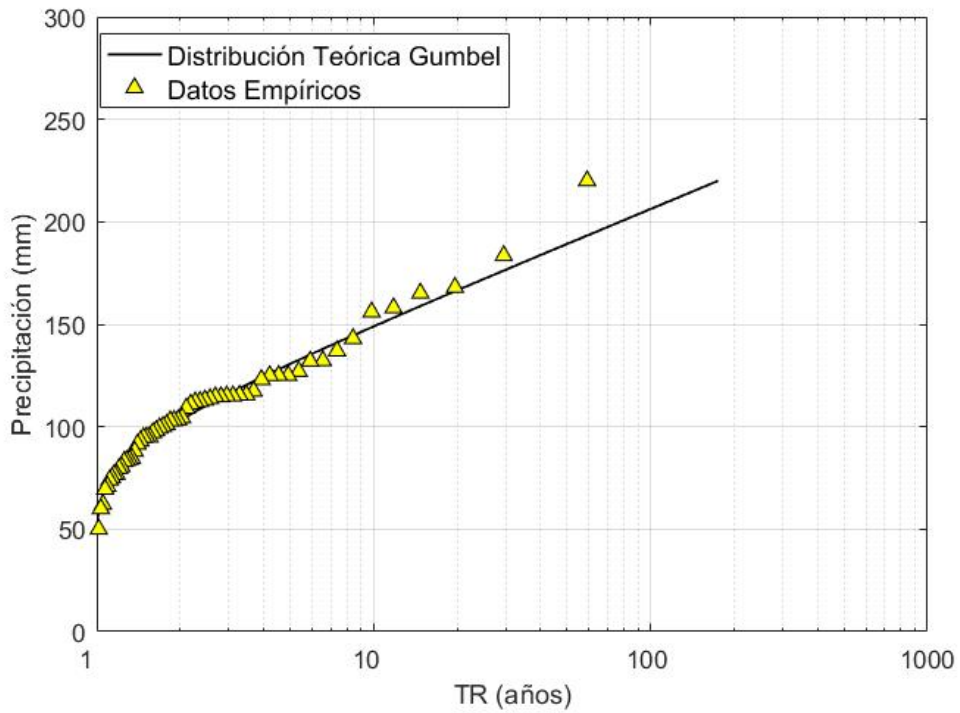


Figura 6.11. Distribución Teórica de Precipitación (GÜMBEL) para la Estación de Pilar.

Tabla 6.4. Precipitación Máxima Diaria (mm) asociada a Periodos de Recurrencia. Series de Estación Encarnación (1951 – 2016) y Pilar (1958 – 2017).

Periodo de Recurrencia (Años)	Precipitación Máxima Diaria ENCARNACIÓN (mm/día)	Intensidad Máxima de 24 hrs ENCARNACIÓN (mm/hr)	Precipitación Máxima Diaria PILAR (mm/día)	Intensidad Máxima de 24 hrs PILAR (mm/hr)
2	106.72	4.45	103.05	4.29
5	142.10	5.92	130.68	5.45
10	165.52	6.90	148.98	6.21
25	195.12	8.13	172.09	7.17
50	217.08	9.05	189.24	7.89
100	238.88	9.95	206.26	8.59
150	251.59	10.48	216.19	9.01
500	289.24	12.05	245.6	10.23
1000	310.90	12.95	262.51	10.94

Curva IDF Encarnación para un TR = 2 años

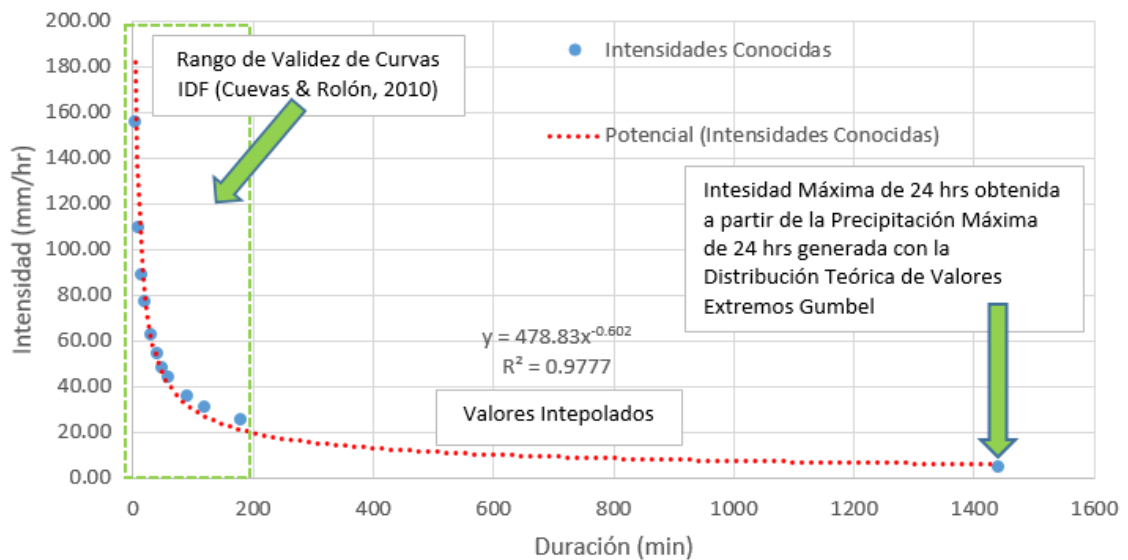


Figura 6.12. Ejemplo de Interpolación de valores de intensidad de tormenta para duraciones entre 3 y 24 hrs.

Las intensidades de tormenta superiores a 24 horas fueron generadas utilizando el mismo procedimiento. Por ejemplo, para una tormenta de 48 horas se tomaron las series de precipitación disponibles en paso diario y se realizó una suma móvil (agrupando dos días consecutivos a lo largo de toda la serie), obteniendo una serie de precipitación en paso de dos días. A esta serie se le aplicó la distribución teórica de máximos (Gümbel) y se obtuvieron precipitaciones máximas de 2 días asociadas a distintos periodos de recurrencia.

El modelo meteorológico seleccionado para simular la tormenta sintética en HEC-HMS es el *Frequency Storm*, el cual requiere intensidades de tormenta en láminas de precipitación (mm). Estas intensidades se muestran en la **Tabla 6.5** y la **Tabla 6.6**.

Tabla 6.5. Tormentas sintéticas generadas para la ciudad de Encarnación

Duración	Intensidad (mm)					
	TR = 5 años	TR = 10 años	TR = 25 años	TR = 50 años	TR = 100 años	TR = 150 años
5 min	15.86	18.46	22.58	26.29	30.61	33.46
15 min	27.20	31.67	38.73	45.10	52.52	57.41
1 hr	53.75	62.59	76.54	89.13	103.78	113.45
2 hr	75.56	87.99	107.60	125.29	145.89	159.48
3 hr	92.22	107.38	131.32	152.91	178.05	194.64
6 hr	109.98	127.07	154.17	176.07	200.28	215.68
12 hr	127.74	147.79	177.02	199.22	222.51	236.72
1 día	145.51	169.53	199.87	222.38	244.73	257.76
2 días	188.61	221.29	262.58	293.22	323.63	341.36

Tabla 6.6. Tormentas sintéticas generadas para la ciudad de Pilar

Duración	Intensidad (mm)					
	TR 5	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 150
5 min	14.92	17.13	20.55	23.58	27.07	29.34
15 min	35.29	40.501	48.59	55.77	64.00	69.37
1 hr	69.47	79.733	95.66	109.79	126.00	136.57
2 hr	79.58	91.331	109.57	125.75	144.33	156.44
3 hr	81.82	93.909	112.66	129.30	148.40	160.85
6 hr	99.15	117.671	134.35	151.50	170.24	182.06
12 hr	116.48	137.436	156.03	173.69	192.09	203.26
1 día	133.81	153.202	177.71	195.89	213.94	224.46
2 días	167.60	190.238	218.83	240.05	261.11	273.39

6.3.3 Pérdidas

La fuente de información de tipo de suelo en la Región Oriental del Paraguay proviene del “Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra” o PRUT (Banco Mundial & MAG-Paraguay, 1995). Allí, a partir de una serie de muestras relevadas, se clasificó taxonómicamente el suelo. Además se definieron clases texturales, las cuales fueron utilizadas como base para elaborar un mapa de Grupos de Suelo de acuerdo al criterio mencionado en el Capítulo 7 del “National Engineering Handbook” (USDA - NRCS, 2009) tal como se muestra en la **Figura 6.13**.

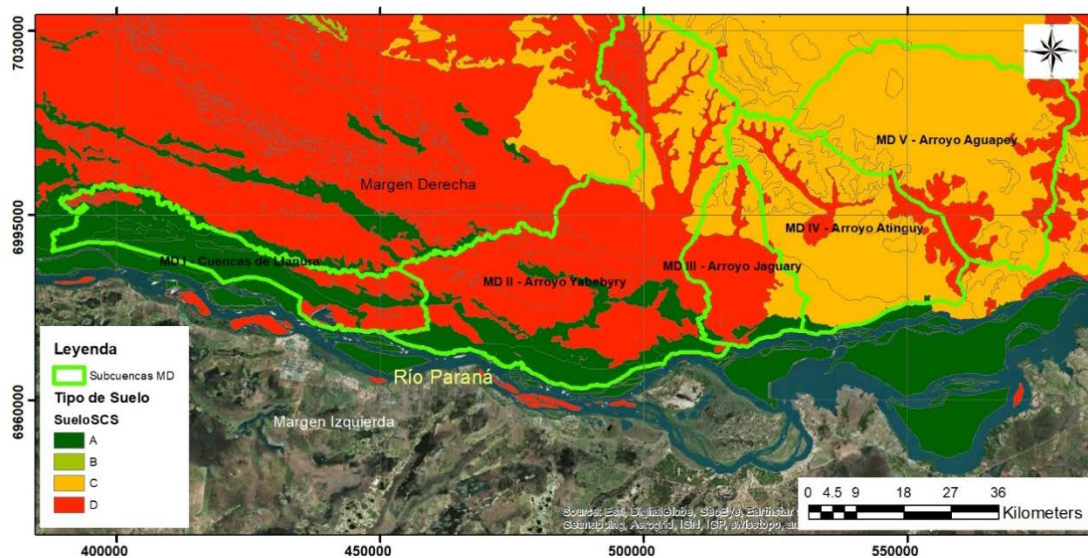


Figura 6.13. Tipo de Suelo SCS de la Margen Derecha.

Otro producto generado en el PRUT fue un mapa de uso posible de la tierra en base a las características del suelo. A partir de este mapa e imágenes satelitales se generó un mapa de uso de suelo, tal como se muestra en la **Figura 6.14**.

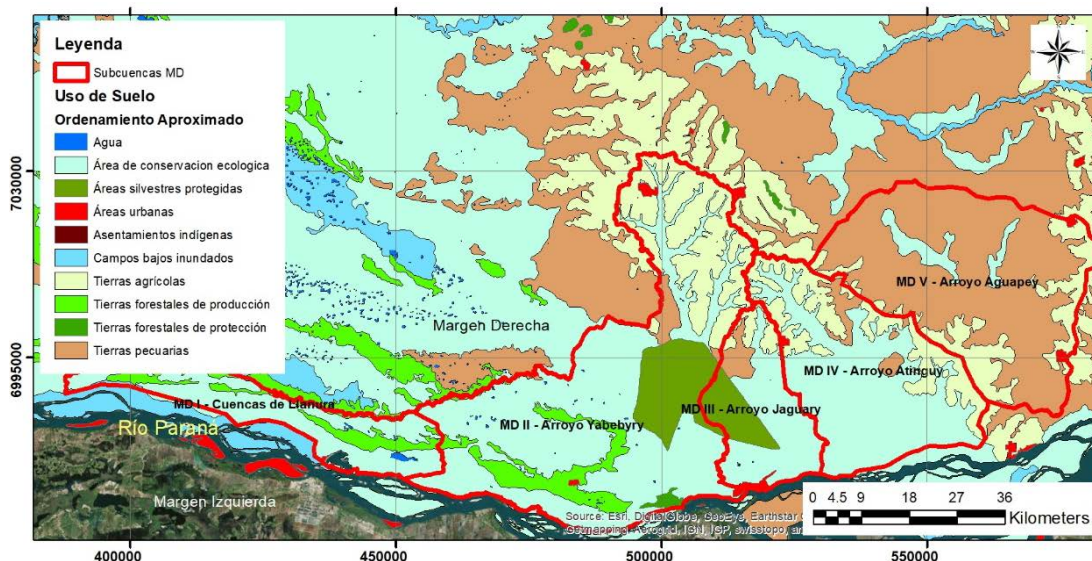


Figura 6.14. Uso de Suelo de la Margen Derecha.

El mapa de uso de suelo que se muestra en la **Figura 6.14** fue reclasificado en base al criterio de Tucci (1993), tal como se muestra en la **Tabla 6.7**.

Tabla 6.7. Criterio utilizado para realizar el cruce de Tipo y Uso de Suelo.

USO ESTIMADO SEGÚN PRUT (Banco Mundial & MAG-Paraguay, 1995)	RECLASIFICACIÓN (Tucci, 1993)				
		A	B	C	D
Tierras Agrícolas	Plantações Regulares em fileiras retas	64	76	84	88
Tierras Pecuarias	Chácaras Normais	56	75	86	91
Tierras Forestales de Producción	Plantações Regulares em fileiras retas	64	76	84	88
Tierras Forestales de Protección	Florestas Normais	36	60	70	76
Áreas Silvestres Protegidas	Florestas Normais	36	60	70	76
Áreas de Conservación Ecológica Especial	Humedales	80	85	90	95
Campos Bajos Inundados	Humedales	80	85	90	95
Asentamientos Indígenas	Florestas Normais	36	60	70	76
Áreas Urbanas	Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Agua	Agua	100	100	100	100

Cruzando los mapas de Tipo y Uso de Suelo en base a la **Tabla 6.7**, se obtuvo un mapa de Número de Curva, tal como se muestra en la **Figura 6.15**.

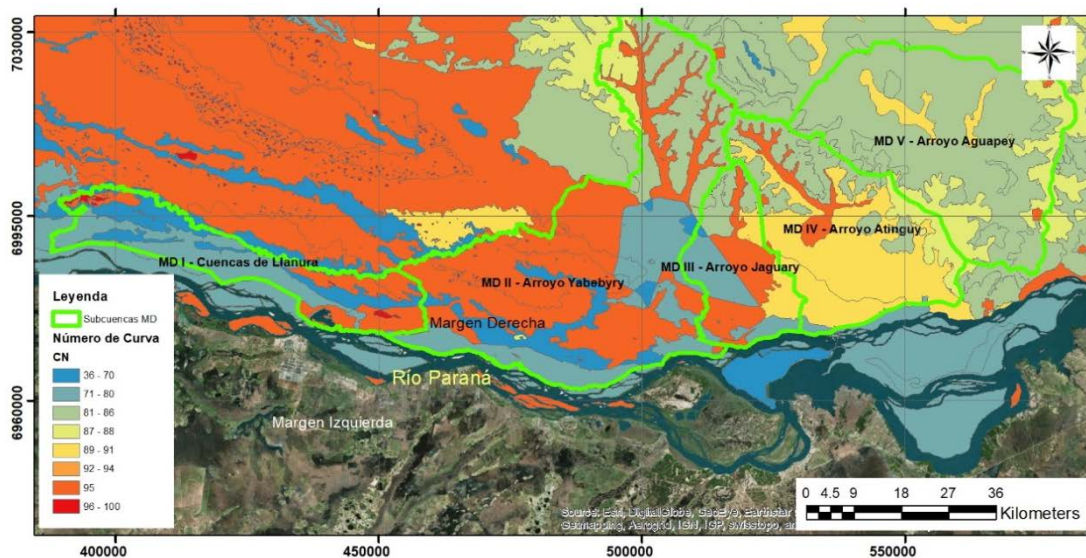


Figura 6.15. Número de Curva de la Margen Derecha.

6.3.4 Escorrentía

Se estableció una relación entre las características del terreno indicadas en la **Tabla 6.1** y el Tipo de Suelo SCS, con lo cual sería posible asociarles a estos un valor de k , tal como se indica en la **Tabla 6.8**.

Tabla 6.8. Asociación de entre el coeficiente k y el Tipo de Suelo SCS.

k	Tipo de suelo SCS
2.0	A
3.0	A – B
4.0	B
4.5	C
5.0	D
5.5	D

Asumiendo situaciones desfavorables, y como hipótesis conservadora, los valores adoptados del coeficiente k de acuerdo al tipo de suelo se especifican en la **Tabla 6.9**.

Tabla 6.9. Criterio asumido para determinación del parámetro k .

Tipo de suelo	k
A	2.5
B	3.5
C	4.5
D	5

Considerando el criterio asumido según la **Tabla 6.9**, se generó un mapa del valor de coeficiente k en la zona de estudio, tal como se muestra en la **Figura 6.16**.

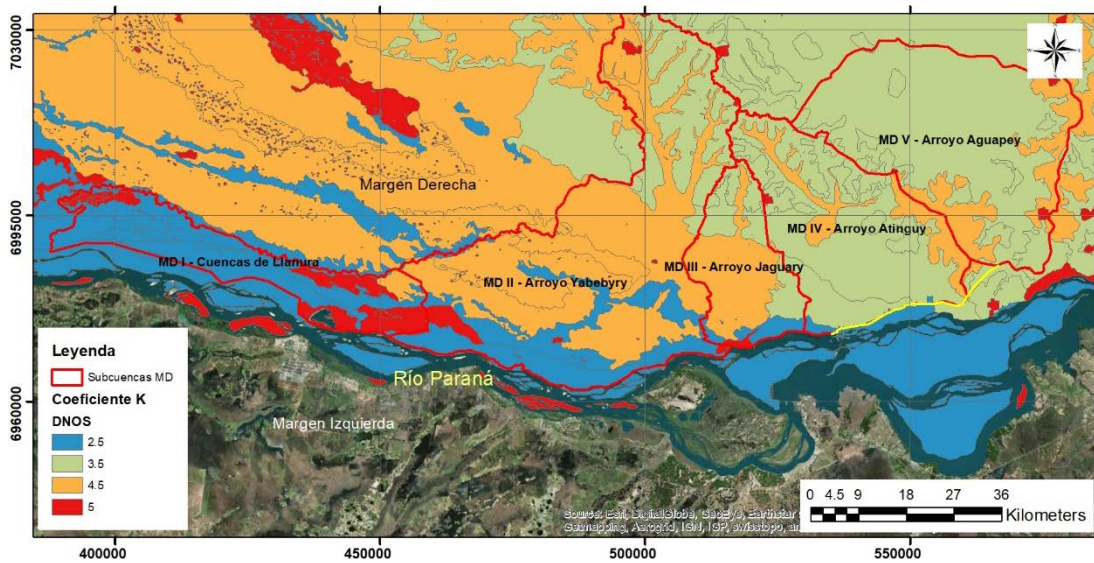


Figura 6.16. Valores del coeficiente k en función al Tipo de Suelo.

6.3.5 Hidrogramas

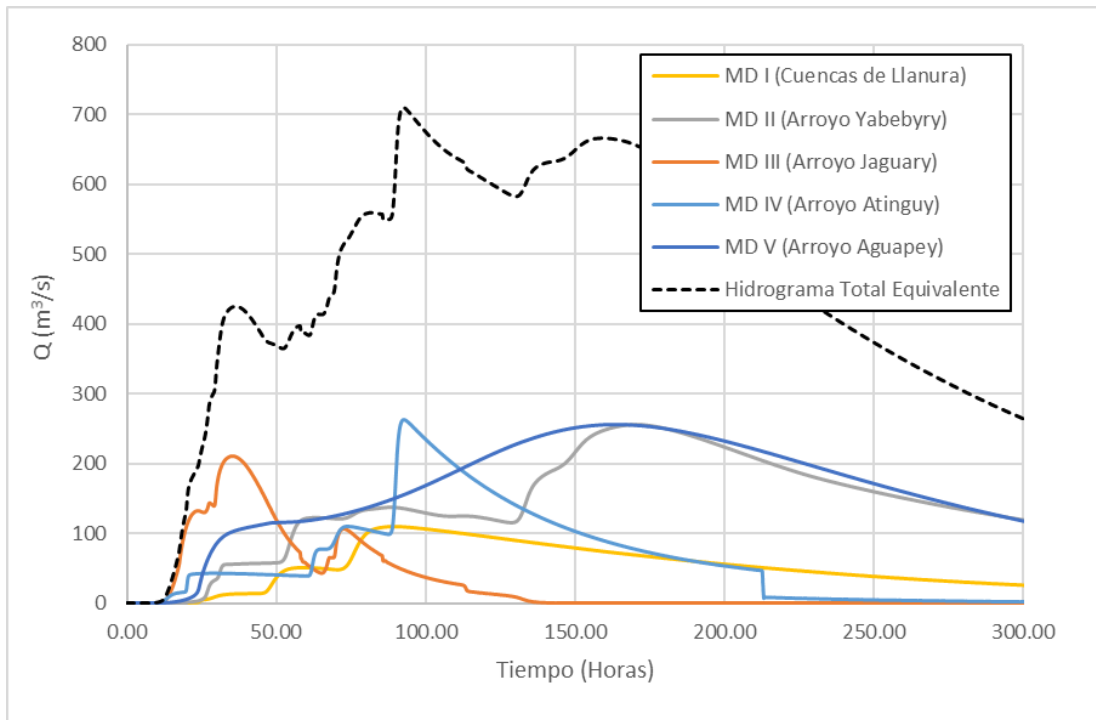
Teniendo en cuenta la ubicación espacial de las estaciones de precipitación utilizadas y los tiempos de concentración de las subcuencas de cada grupo de cuencas, las tormentas utilizadas para la simulación se resumen en la **Tabla 6.10**.

Tabla 6.10. Tormentas Sintéticas utilizadas para cada grupo de cuencas

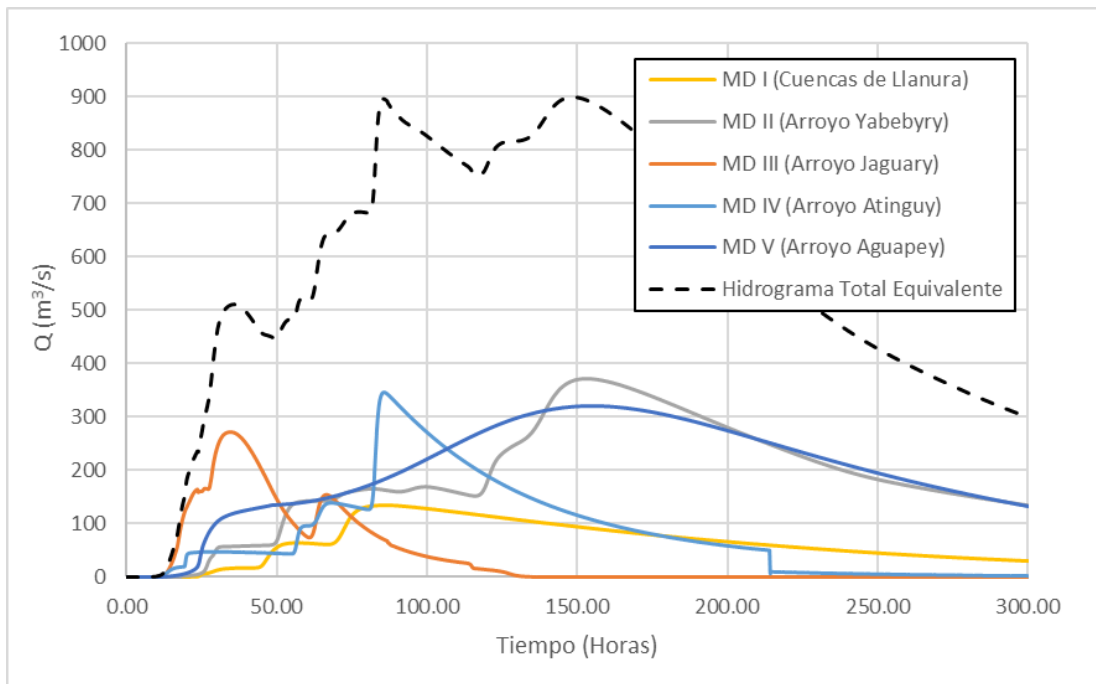
GRUPO DE CUENCAS	Estación	Duración de Tormenta (hr)
MD I - Cuencas de Llanura	Pilar	48 hrs
MD II - Arroyo Yabebry	Encarnación	48 hrs
MD III - Arroyo Jaguar	Encarnación	24 hrs
MD IV - Arroyo Atinguy	Encarnación	24 hrs
MD V - Aguapey	Encarnación	48 hrs

En la **Figura 6.17** se muestran los caudales máximos incrementales por cuenca al embalse Itatí-Itacorá, asociados a los periodos de retorno de 5, 10 y 50 años.

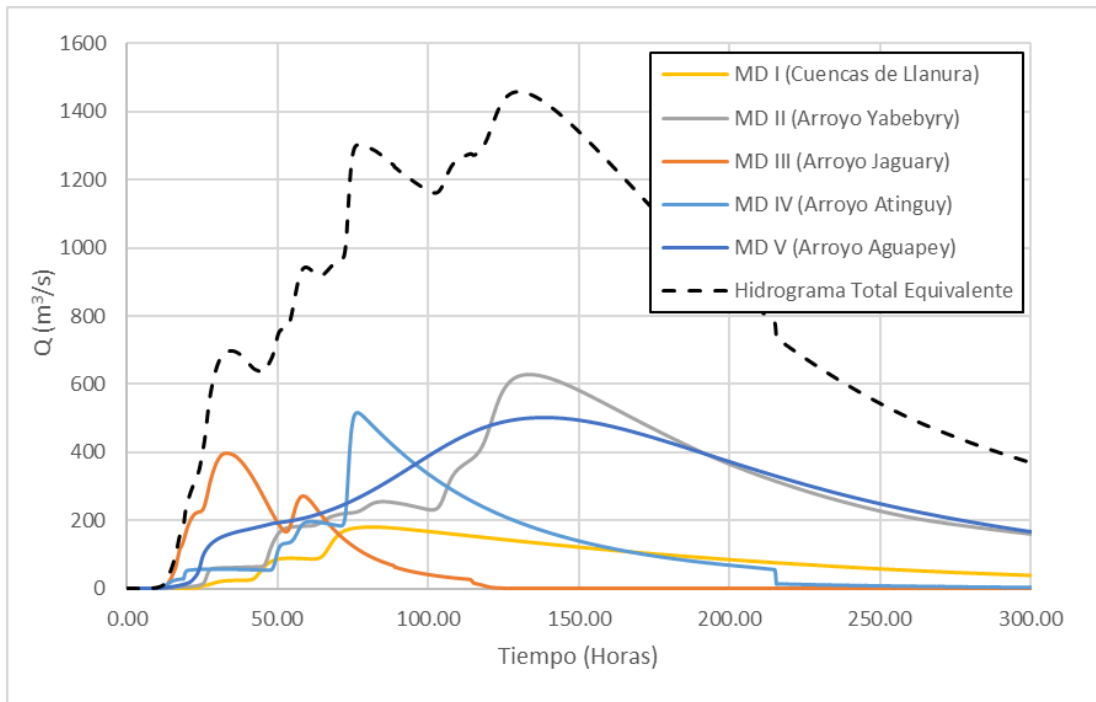
Por otro lado, a los fines del diseño de un canal a pie de presa para las Alternativas de cierre 1B y 2B (**Figura 6.18**) se obtuvieron los hidrogramas puntuales presentados en la **Figura 6.19**. En la **Tabla 6.11** se resumen los caudales máximos puntuales para el diseño del canal a pie de presa para cada alternativa de cierre.



a) TR = 5 años



b) TR = 10 años



c) TR = 50 años

Figura 6.17. Hidrogramas de las cuencas incrementales (MD) al embalse Itatí-Itacorá para distintos tiempos de recurrencia (TR).

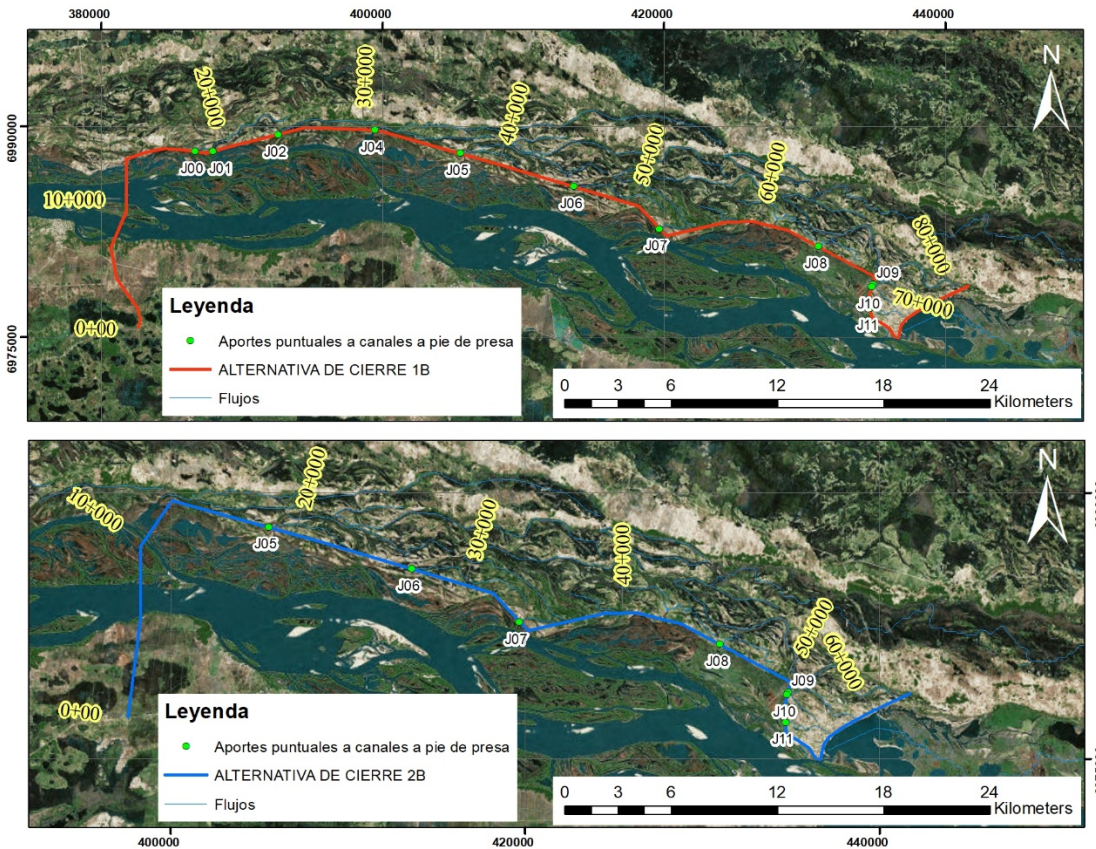
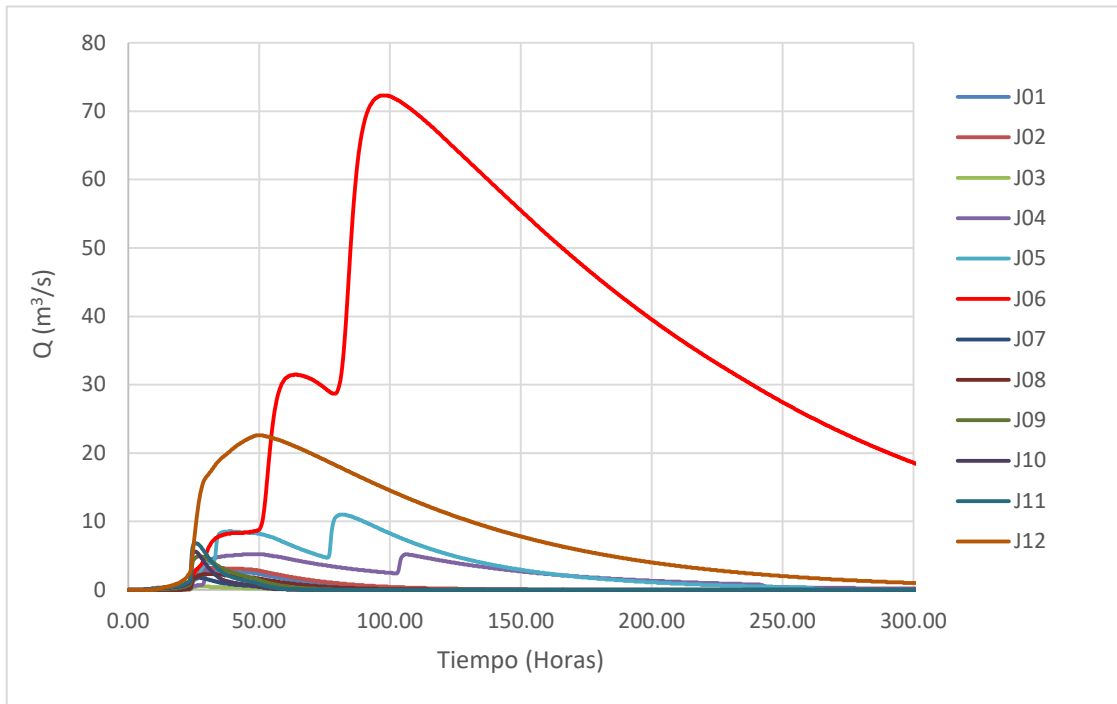
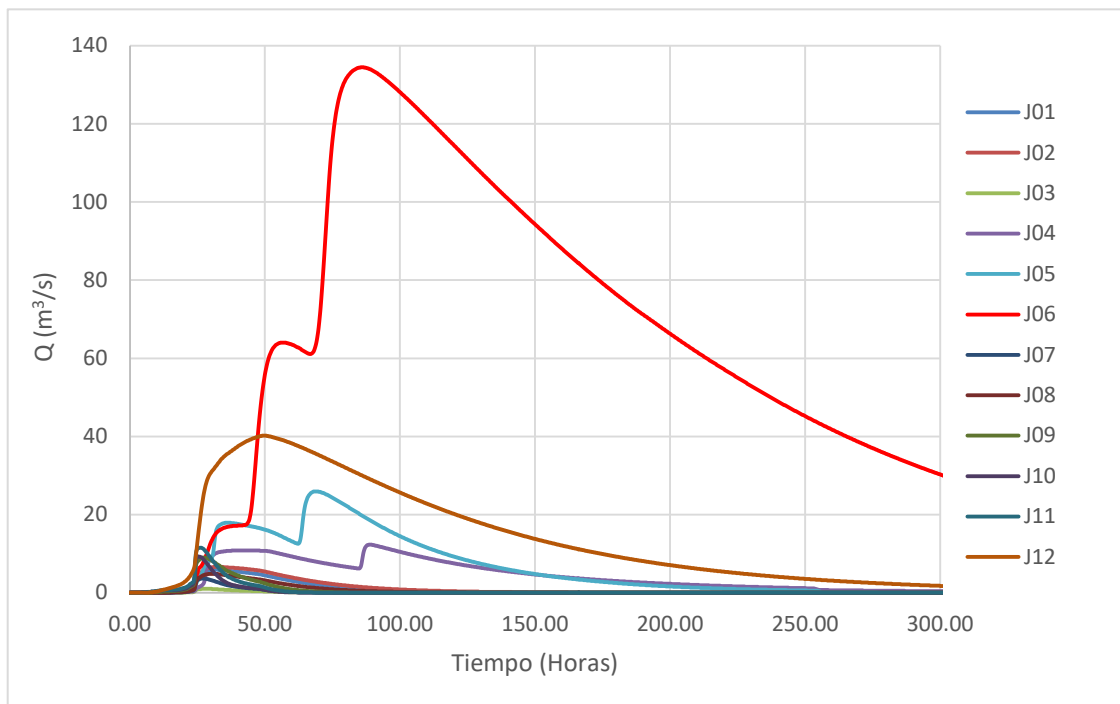


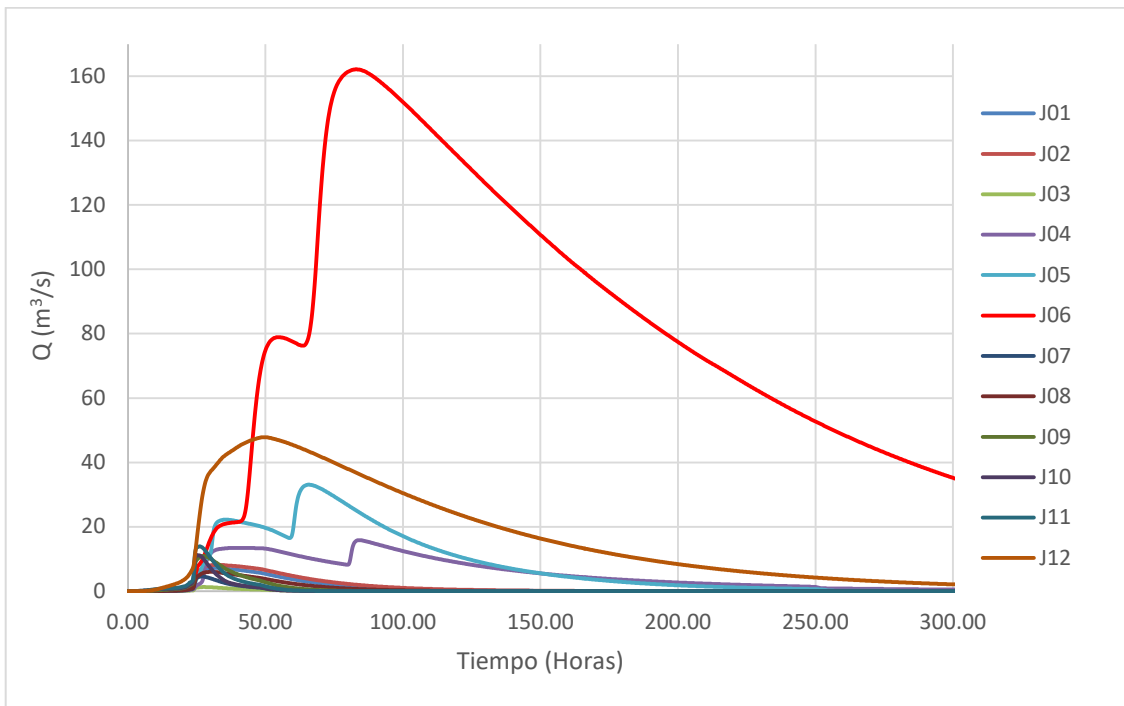
Figura 6.18. Aportes puntuales a canal de pie de presa para las Alternativas 1B y 2B



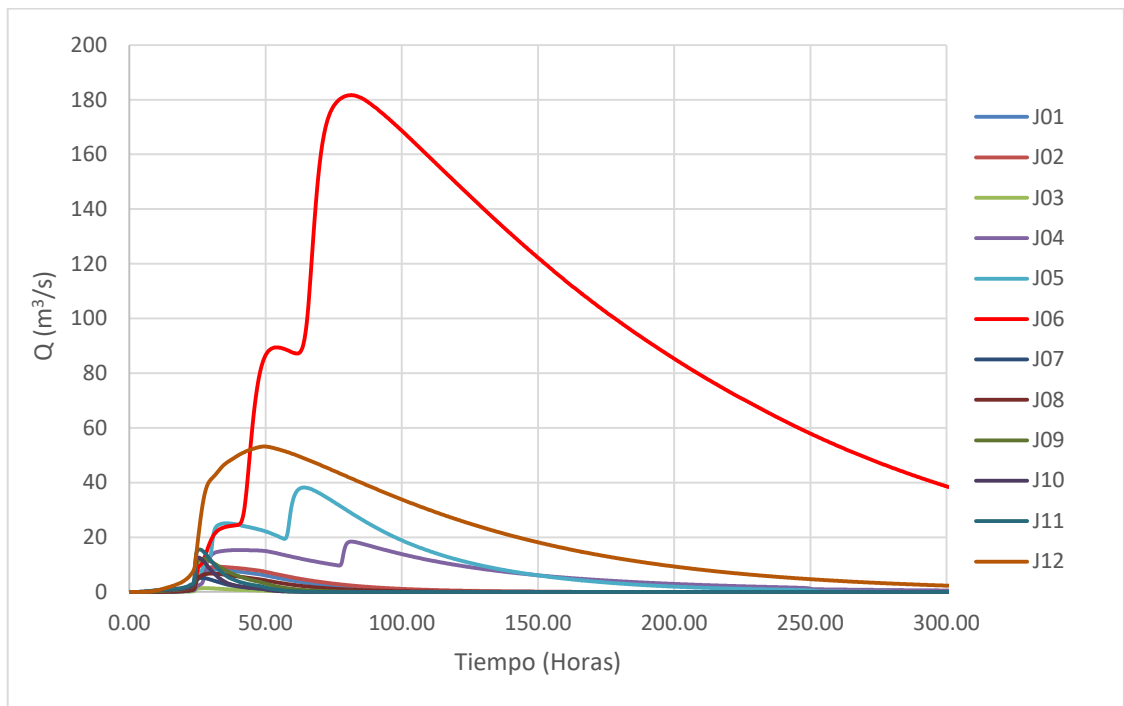
a) TR = 2 años



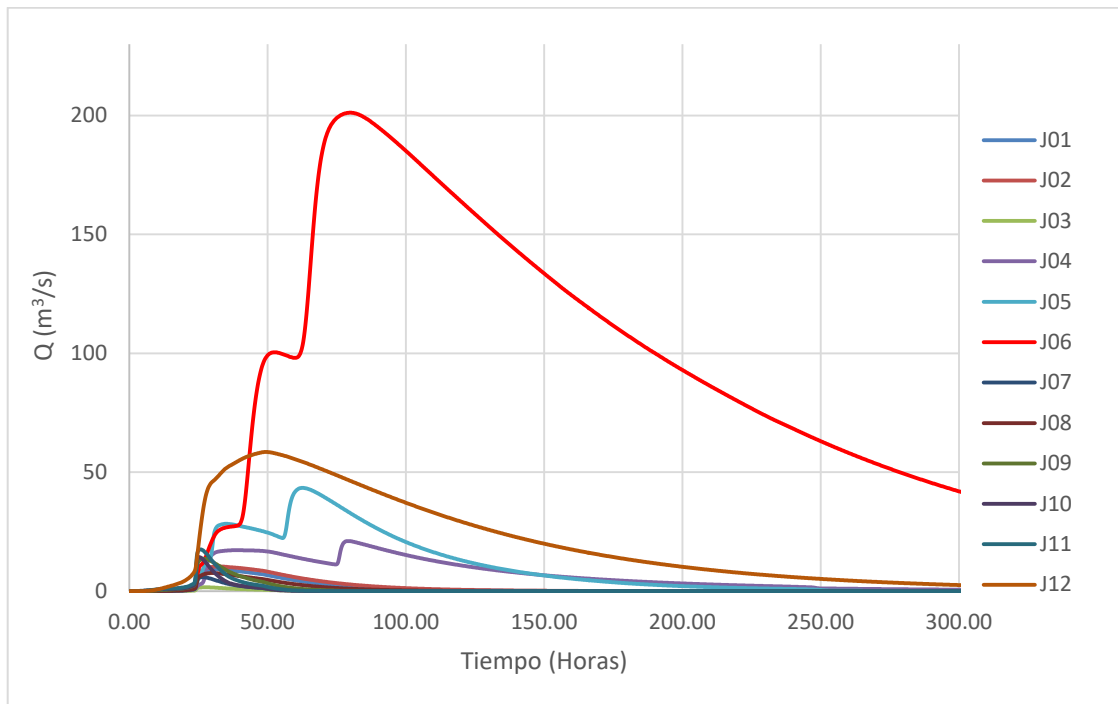
b) TR = 10 años



c) TR = 25 años



d) TR = 50 años



e) TR = 100 años

Figura 6.19. Hidrogramas de diseño para los canales a pie de presa para distintos tiempos de recurrencia (TR).

Tabla 6.11. Caudales de diseño para canal a pie de presa (Alternativa de cierre 1B y 2B)

Nodo	Progresiva (Alternativa 1 B)	Progresiva (Alternativa 2 B)	Q pico (m ³ /s)				
			TR02	TR10	TR25	TR50	TR100
J00	17+836	-	0.50	1.00	1.30	1.40	1.60
J01	19+143	-	2.80	5.90	7.20	8.20	9.20
J02	23+921	-	3.20	6.60	8.20	9.20	10.30
J04	30+897	-	5.20	12.30	15.80	18.40	21.00
J05	37+174	18+463	11.00	25.90	33.10	38.20	43.40
J06	45+609	26+898	72.30	134.50	162.20	181.70	201.20
J07	52+598	33+886	1.80	3.60	4.60	5.10	5.90
J08	64+574	45+863	2.30	4.80	6.00	6.70	7.60
J09	69+705	50+994	4.90	9.00	10.90	12.10	13.60
J10	69+863	51+152	5.60	9.30	11.20	12.60	14.30
J11	71+432	52+722	6.80	11.50	13.90	15.50	17.50

6.4 Margen argentina

6.4.1 Subcuencas

La **Figura 6.20** muestra la zona de estudio correspondiente al tramo del río Paraná que va desde el embalse de Yacyretá hasta el cierre Itatí-Itacorá, y la división adoptada en 12 subcuencas. La **Figura 6.21** muestra en detalle las subcuencas identificadas.

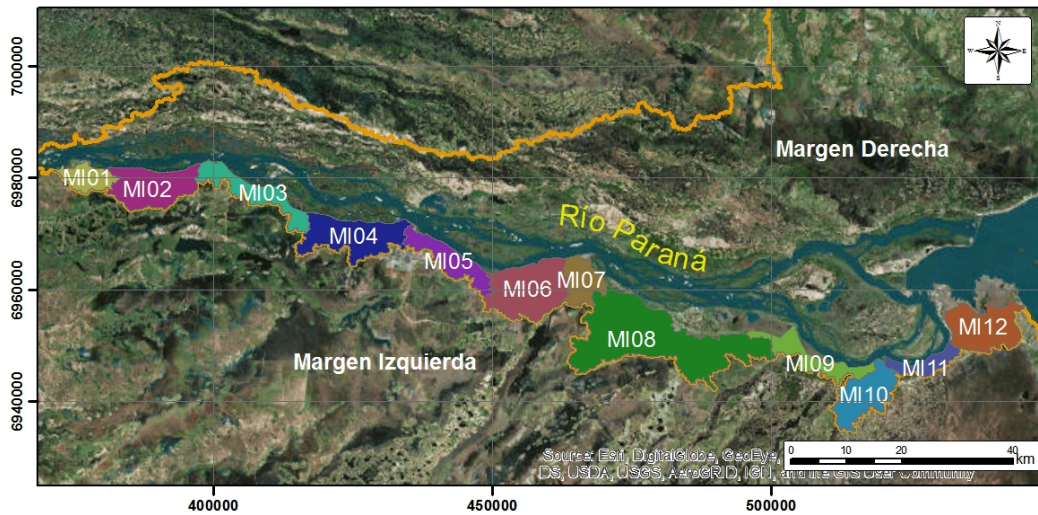
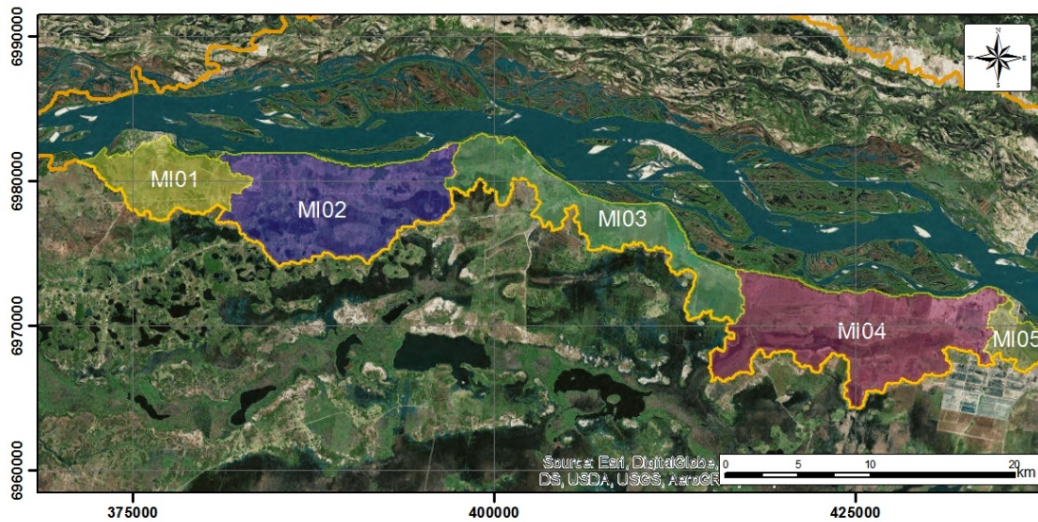
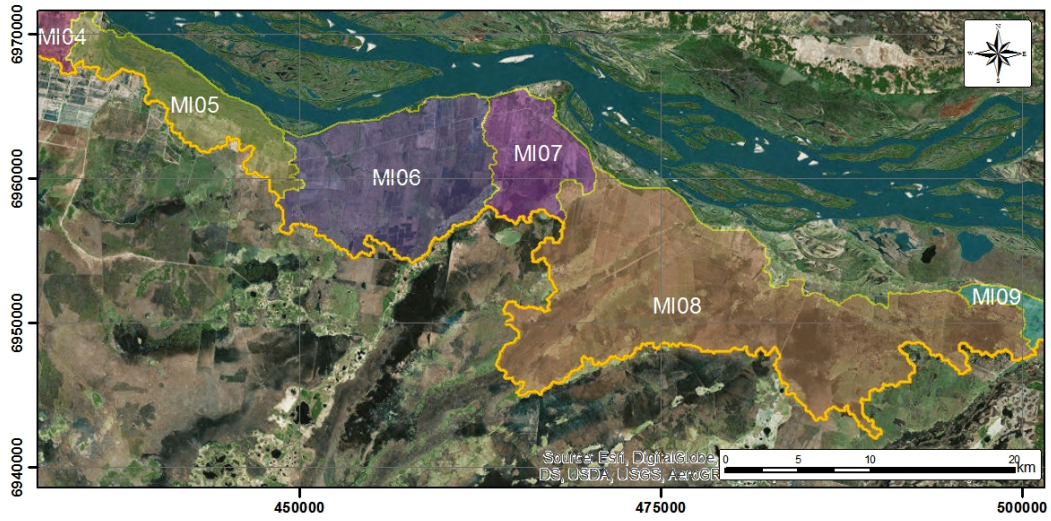


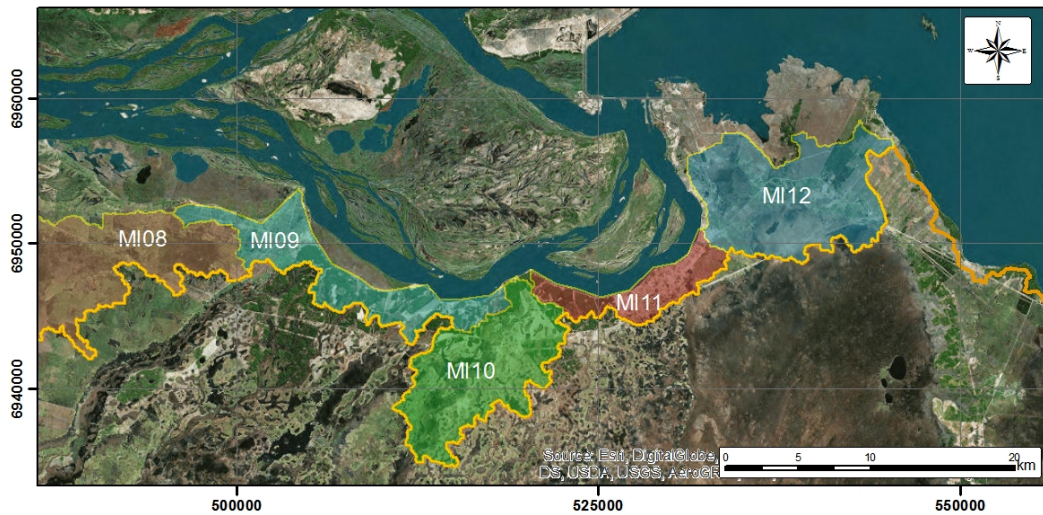
Figura 6.20. Subcuencas de la margen izquierda



a) Subcuencas MI01 a MI04



b) Subcuencas MI05 a MI08



c) Subcuencas MI09 a MI12

Figura 6.21. Detalle de subcuencas de la margen izquierda.

Para las 12 subcuencas se determinaron el área, la longitud de los cauces más extensos y la pendiente media de dichos cauces. Esta información se visualiza en la **Tabla 6.12**.

Tabla 6.12. Características topográficas de las subcuencas.

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

6.4.2 Precipitación

Se adoptaron las tormentas sintéticas generadas para la margen paraguaya. Específicamente, para los eventos de 5, 10 y 50 años de recurrencia se utilizaron las tormentas sintéticas de 24 horas de duración asociadas a la Estación Encarnación, situada en Paraguay.

6.4.3 Pérdidas

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

Para la clasificación de los suelos se utilizó el Inventario de Suelos de la República Argentina, descargado del Sistema de Gestión de Datos Espaciales del INTA⁷. Este proporciona una clasificación de los suelos y una evaluación de las tierras del país. La escala gráfica es 1:500.000 para la Provincia de Corrientes. La clasificación taxonómica de suelos que se publica es de acuerdo al *Soil Taxonomy* (SCS, 1975).

En el área de interés se reconocen principalmente suelos de los órdenes de los Alfisoles, Molisoles e Inceptisoles, cuya textura superficial predominante es franco-arenosa, siguiendo en importancia la textura franca y areno-franca (**Figura 6.22**). La textura subsuperficial predominante es franco-arcillo-arenosa, franco-arenosa y areno-franca. En general, para esta zona, la permeabilidad de los suelos es lenta, caracterizada por un drenaje deficiente y una alta susceptibilidad de anegamiento. A partir de estas características, se ha considerado el grupo hidrológico de suelo del tipo B.

⁷ <http://geointa.inta.gov.ar>

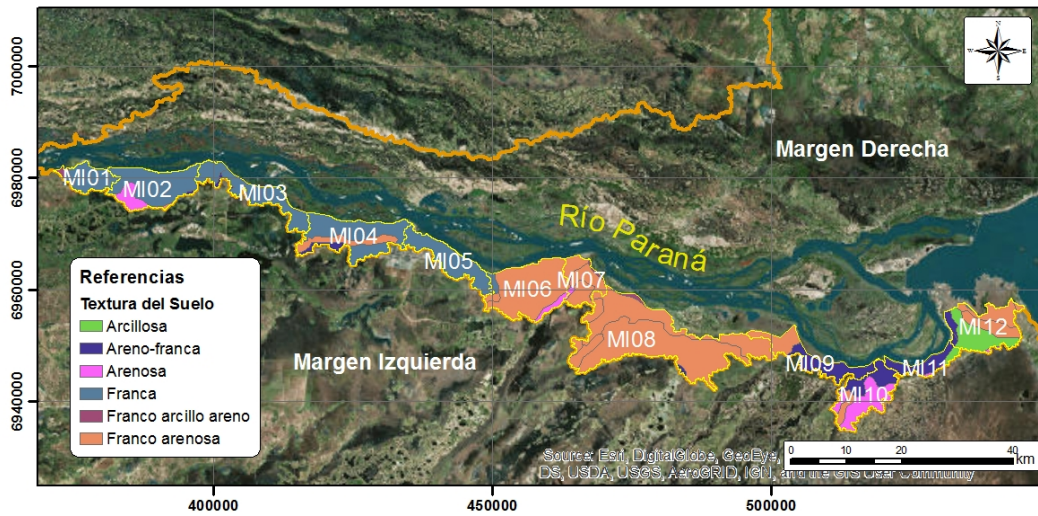


Figura 6.22. Textura del suelo superficial

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

En la **Figura 6.23** se muestra el uso de suelo para las 12 subcuencas, que incluyen, entre otros, cultivos de herbáceas y especies arbóreas, cuerpos de agua, bosques y pastizales. Para determinar el Número de Curva (CN) se utilizó la clasificación del NRCS (2004), que permite obtener el valor de CN a partir de la cobertura vegetal, condición hidrológica y tipo de suelo. En la **Tabla 6.13** se muestran los valores de CN que se han adoptado para los distintos usos de suelos. Al analizar en detalle las imágenes satelitales, a la zona de “bosques cerrados” se le hizo corresponder la clasificación de “herbáceas cerradas en áreas regularmente inundadas / anegadas”.

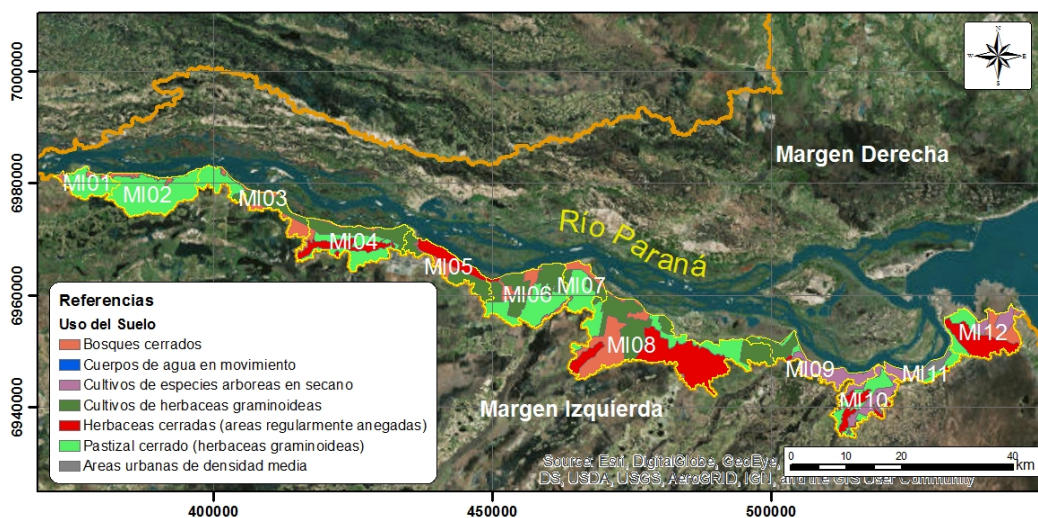


Figura 6.23. Uso del suelo

Tabla 6.13. Valores de CN adoptados para distintos usos de suelo.

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

6.4.4 Escorrentía

Se ha adoptado el valor de $k = 3$ (terreno común, cubierto de vegetación, absorción apreciable). Los tiempos de concentración a partir de esta metodología se presentan en la **Tabla 6.14**.

Tabla 6.14. Tiempo de concentración de las subcuencas.

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

6.4.5 Hidrogramas

El esquema de modelación implementado se muestra en la **Figura 6.24**. Los datos utilizados en la modelación para área, tiempo de retardo y Curva Número (CN) se presentan en la **Tabla 6.15**.

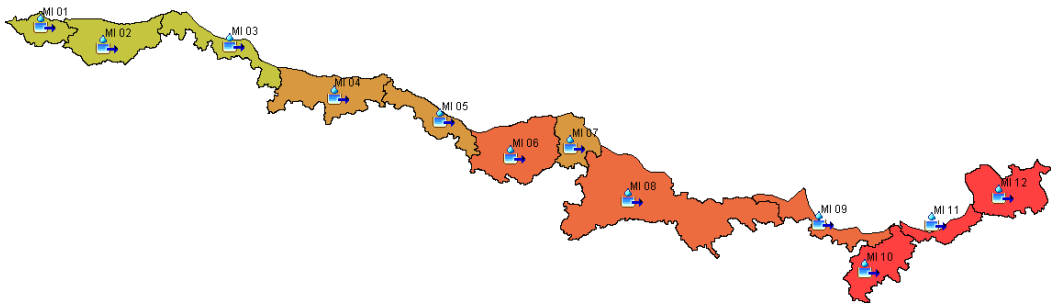
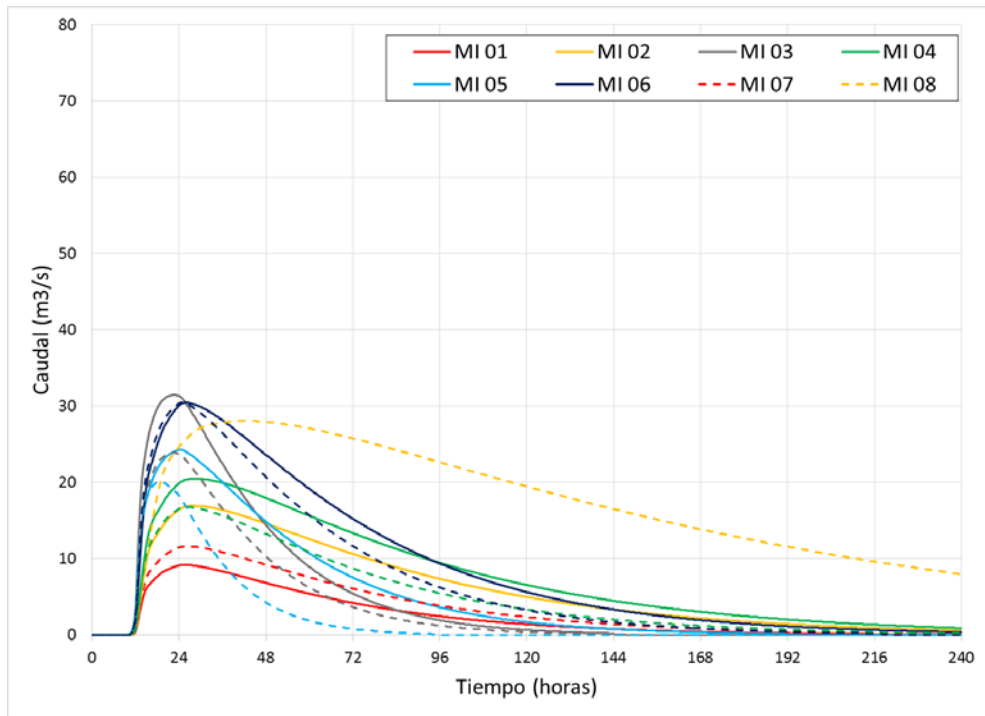


Figura 6.24. Esquema de modelación

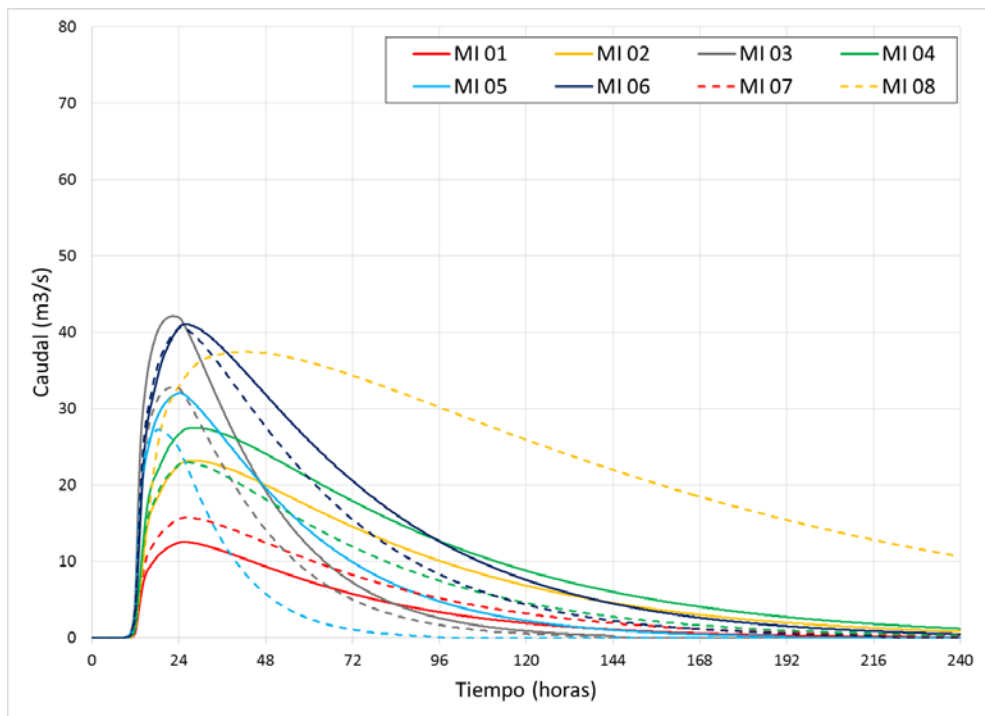
Tabla 6.15. Datos utilizados para la modelación.

Subcuenca	Area (km ²)	Tlag (min)	CN
MI 1	36	490	70
MI 2	93	798	70
MI 3	65	384	74
MI 4	103	841	74
MI 5	59	469	77
MI 6	121	781	73
MI 7	48	499	72
MI 8	276	1681	76
MI 9	56	304	69
MI 10	75	616	70
MI 11	30	196	71
MI 12	91	507	75

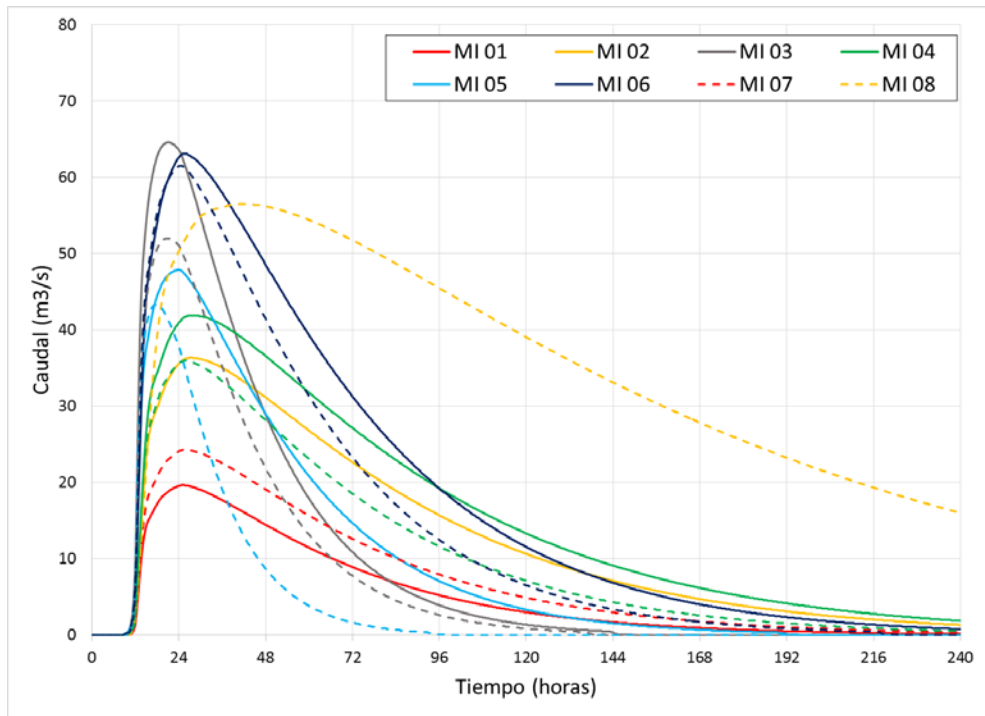
En la **Figura 6.25** se muestran los hidrogramas de cada subcuenca para los períodos de retorno de 5, 10 y 50 años. Se observa que los caudales pico máximos son de aproximadamente 30 m³/s, 40 m³/s y 65 m³/s, respectivamente. La **Figura 6.26** muestra los hidrogramas totales equivalentes para cada recurrencia.



a) $Tr = 5$ años



b) $Tr = 10$ años



c) $Tr = 50$ años

Figura 6.25. Hidrogramas por sucesna

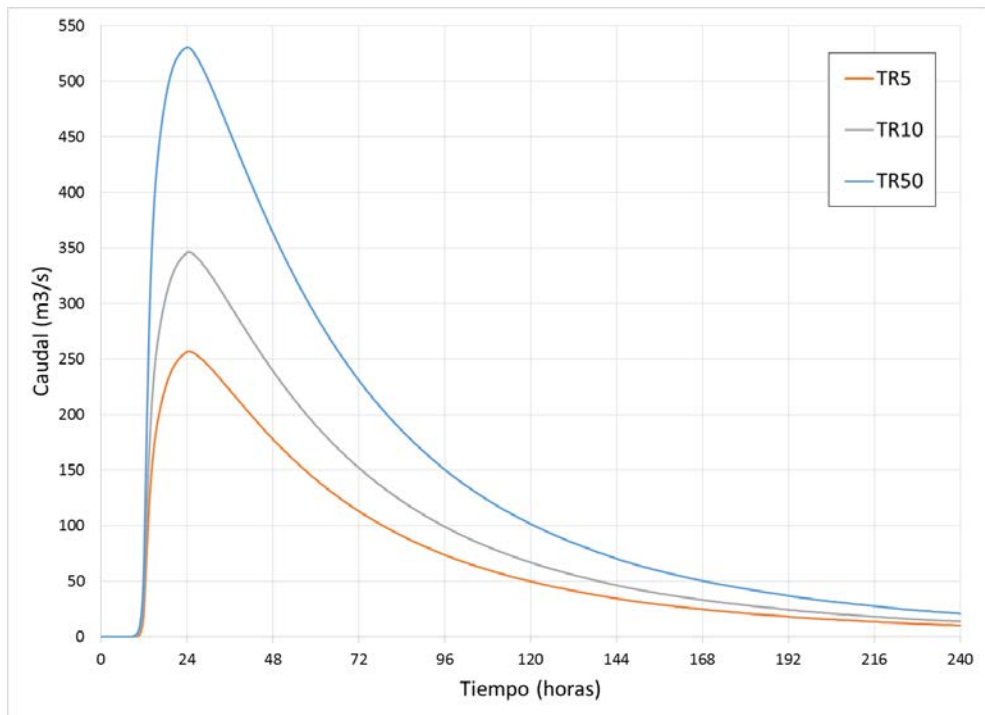


Figura 6.26. Hidrogramas totales equivalentes

7 RED DE MONITOREO

7.1 Objetivo de revisión

La red hidrométrica instalada en el área de influencia del embalse de Itatí cuenta con una instalación suficiente para el monitoreo del río Paraná en las condiciones actuales. Sin embargo, para avanzar con el proyecto de presa de Itatí-Itacorá se considera necesario instalar instrumental hidrométrico adicional, el cual permitiría tanto mejorar el diseño de la obra como asistir en una operación más eficiente.

7.2 Red actual

La red actual cuenta con los hidrómetros cuya ubicación se indica en la **Figura 7.1** y la **Tabla 7.1**. Estos registran datos de nivel de agua de forma continua y son almacenados en sistemas de base de datos de acceso público. La **Tabla 7.2** presenta algunos detalles.



Figura 7.1. Ubicación de red hidrométrica en el área de influencia.

Tabla 7.1. Ubicación y Fuente de las estaciones hidrométricas.

#	Río	Estación	Responsable	Latitud	Longitud
1	Paraná	CHY	EBY	27° 29' 15" S	56° 43' 47" W
2	Paraná	Ituzaingó	SSPVNyMM – Argentina	27° 35' 7" S	56° 41' 38" W
3	Paraná	Ayolas	DINAC – Paraguay	27° 24' 28" S	56° 51' 52" W
4	Paraná	Ita Ibaté	SSPVNyMM – Argentina	27° 25' 19" S	57° 20' 0" W
5	Paraná	Itatí	SSPVNyMM – Argentina	27° 15' 59" S	58° 14' 40" W
6	Paraná	Paso de la Patria	SSPVNyMM – Argentina	27° 20' 00" S	58° 35' 00" W
7	Paraná	Corrientes	SSPVNyMM – Argentina	27° 28' 30" S	58° 50' 0" W
8	Paraná	Empedrado	SSPVNyMM – Argentina	27° 57' 32" S	58° 49' 12" W
9	Paraguay	Pilar	DINAC – Paraguay	26° 52' 9" S	58° 19' 23" W
10	Paraguay	Puerto Bermejo	SSPVNyMM – Argentina	26° 55' 30" S	58° 30' 29" W

Tabla 7.2. Tipo de instrumento, frecuencia de registro, operación y mantenimiento de las estaciones hidrométricas.

#	Estación	Tipo de Instrumento	Frecuencia de Registro	Operación	Mantenimiento
1	CHY	Sensor Automático (Rittmeyer)	Horario	EBY	EBY
2	Ituzaingó	Escala Tradicional	12 horas	PNA	SSPVNyMM
3	Ayolas	Escala Tradicional	24 horas	DINAC	DINAC
4	Ita Ibaté	Escala Tradicional	12 horas	PNA	SSPVNyMM
5	Itatí	Escala Tradicional	12 horas	PNA	SSPVNyMM
6	Paso de la Patria	Escala Tradicional	12 horas	PNA	SSPVNyMM
7	Corrientes	Escala Tradicional	12 horas	PNA	SSPVNyMM
8	Empedrado	Escala Tradicional	12 horas	PNA	SSPVNyMM
9	Pilar	Escala Tradicional	24 horas	DINAC	DINAC
10	Puerto Bermejo	Escala Tradicional	12 horas	PNA	SSPVNyMM

Se recomienda para la escala de Itatí realizar aforos en época de crecidas a fin de verificar la curva altura-caudal presentada en el Primer Informe Parcial, poniendo énfasis en las mediciones de caudal sobre la planicie de margen derecha. El resto de las escalas presentan resultados consistentes.

7.3 Red propuesta

Para ser de utilidad al diseño de Itatí-Itacorá se debería contemplar la instalación de nuevos hidrómetros sobre el río Paraná, y también en cursos afluentes a su embalse que permitan cuantificar los aportes laterales. Algunos hidrómetros cumplirían con funciones de relevancia previa a la construcción del aprovechamiento, que se tornarían secundarias luego de su construcción, pudiendo eventualmente ser relocalizados.

En la **Figura 7.2** se indica la red de hidrómetros propuesta en orden de prioridad. Algunos detalles se muestran en la **Figura 7.3**. A continuación se explica la funcionalidad de cada uno.

- Hidrómetros ‘Alternativa 1’ (**Figura 7.3a**) y ‘Alternativa 2’ (**Figura 7.3b**): ubicados inmediatamente aguas abajo de cada uno de las dos alternativas de cierre en zonas aptas para analizar los niveles de la restitución. En el caso de construirse la Alternativa 1 el hidrómetro ‘Alternativa 2’ se debería desafectar y trasladar a otra ubicación a definir ya que quedaría en el embalse sin cumplir función alguna. Si se optara por la Alternativa 2, el hidrómetro ‘Alternativa 1’ podría no considerarse, ya que cumpliría con la misma función que el actual ubicado en la localidad de Itatí, el cual cuenta con más de 100 años de registros.
- Hidrómetro ‘Yahapé’, en la localidad homónima de margen argentina (o en su defecto en la localidad de Cerrito de margen paraguaya), sobre el río Paraná. Dado que la localidad de Yahapé se encuentra a una cota superior al terraplén natural, no se vería afectada por la inundación del embalse, resulta particularmente apropiada.

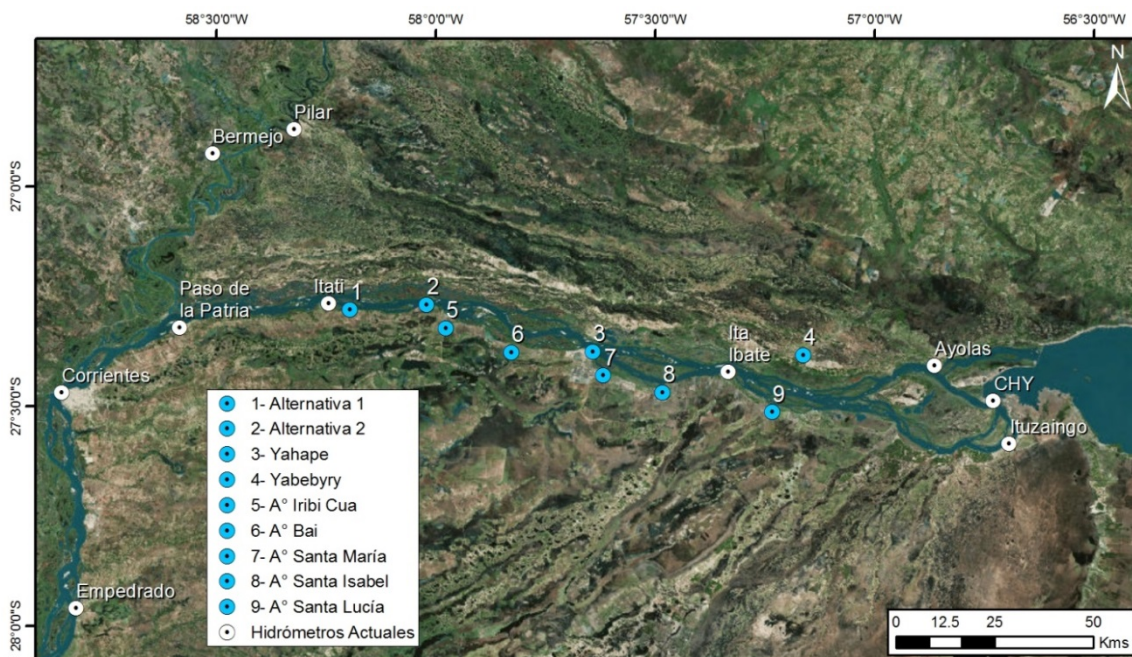


Figura 7.2. Ubicación de hidrómetros propuestos.

- Hidrómetro ‘Yabebyry’ (**Figura 7.3c**), sobre el río homónimo de margen paraguaya, a la altura de la ciudad homónima (57°9'48"O - 27°23'2"S). Este registro permitiría cuantificar este aporte de margen derecha al embalse.
- Hidrómetro ‘Iribí Cuá’ (**Figura 7.3d**), sobre el arroyo homónimo de margen Argentina, a la altura del puente de la Ruta Nacional 12 (57°58'36"O, 27°19'22"S). Este registro permitiría cuantificar este aporte de margen izquierda al embalse.
- Hidrómetro ‘Bai’, sobre el arroyo homónimo de margen argentina, a la altura del puente de la Ruta Nacional 12 (57°49'42"O, 27°22'37"S). Este registro permitiría cuantificar este aporte de margen izquierda al embalse.
- Hidrómetro ‘Santa María’ (**Figura 7.3e**), sobre el arroyo homónimo de margen argentina, a la altura del puente de la Ruta Nacional 12 (57°37'5"O, 27°25'49"S). Este registro permitiría cuantificar este aporte de margen izquierda al embalse.
- Hidrómetro ‘Santa Isabel’ (**Figura 7.3f**), sobre el arroyo homónimo de margen argentina, a la altura del puente de la Ruta Nacional 12 (57°29'00"O, 27°28'07"S). Este registro permitiría cuantificar este aporte de margen izquierda al embalse.
- Hidrómetro ‘Santa Lucía’ (**Figura 7.3g**), sobre el arroyo homónimo de margen argentina, a la altura del puente de la Ruta Nacional 12 (57°14'00"O, 27°30'49"S). Este registro permitiría cuantificar este aporte de margen izquierda al embalse.

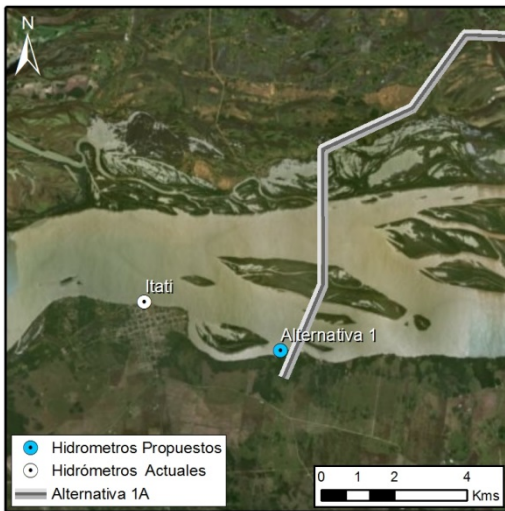
Tabla 7.3. Ubicación y Fuente de las estaciones hidrométricas propuestas.

#	Río	Estación	Responsable	Tipo de Instrumento	Latitud	Longitud
1	Paraná	Alternativa 1	COMIP	Automático	27° 16' 44" S	58° 12' 20" W
2	Paraná	Alternativa 2	COMIP	Automático	27° 16' 18" S	58° 01' 47" W
3	Paraná	Yahapé	COMIP	Automático	27° 22' 35" S	57° 38' 40" W
4	Yabebyry	Yabebyry	COMIP	Automático	27° 23' 02" S	57° 09' 48" W
5	Iribí Cuá	Iribí Cuá	COMIP	Automático	27° 19' 22" S	57° 58' 36" W
6	Bai	Bai	COMIP	Automático	27° 22' 37" S	57° 49' 42" W
7	Santa María	Santa María	COMIP	Automático	27° 25' 49" S	57° 37' 05" W
8	Santa Isabel	Santa Isabel	COMIP	Automático	27° 28' 07" S	57° 29' 00" W
9	Santa Lucía	Santa Lucía	COMIP	Automático	27° 30' 49" S	57° 14' 00" W

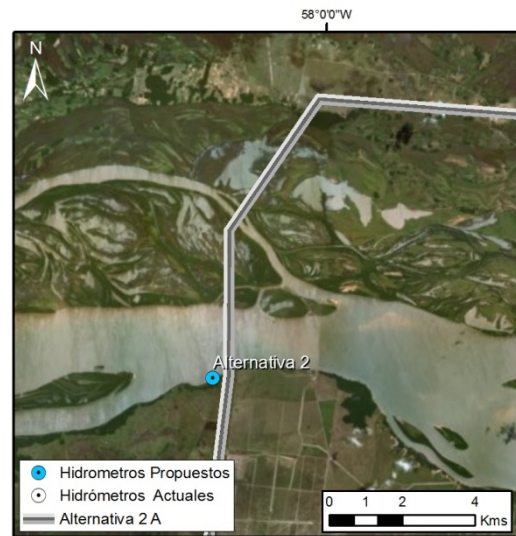
En todos los casos se recomienda sensores automáticos que tengan la capacidad de almacenar la información y si es posible transmitir en tiempo real.

Sobre todos los afluentes deberían realizarse campañas de aforo de caudal, y estimar el efecto de remanso del embalse sobre ese curso de agua para analizar la posibilidad de construir curvas altura-caudal (en caso contrario habría que trasladarlos hacia aguas arriba).

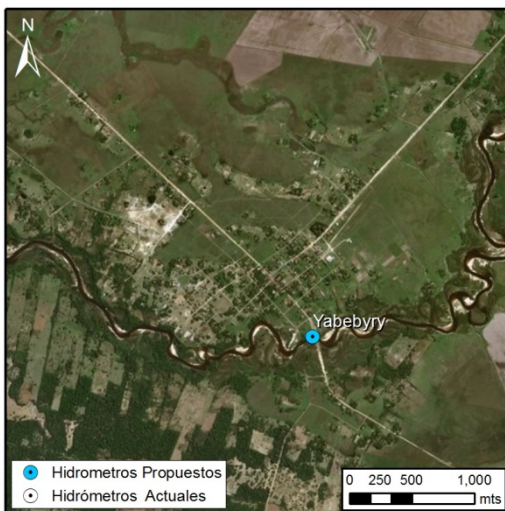
Las estaciones ‘Alternativa 1’ y ‘Alternativa 2’ sirven en una primera etapa para la elaboración de las curvas de restitución de ambas presas. Se deben realizar aforos de forma continuada para poder establecer estas curvas. El sensor de la presa que se termine construyendo tendrá la función de establecer los niveles aguas abajo correspondientes a la restitución. Su ubicación definitiva deberá analizarse en conjunto con los esquemas de construcción para que no se vea afectado y no deba ser reubicado en ningún momento.



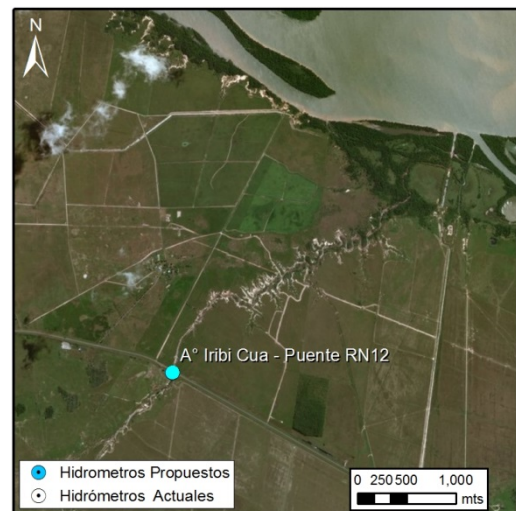
a) ‘Alternativa 1’



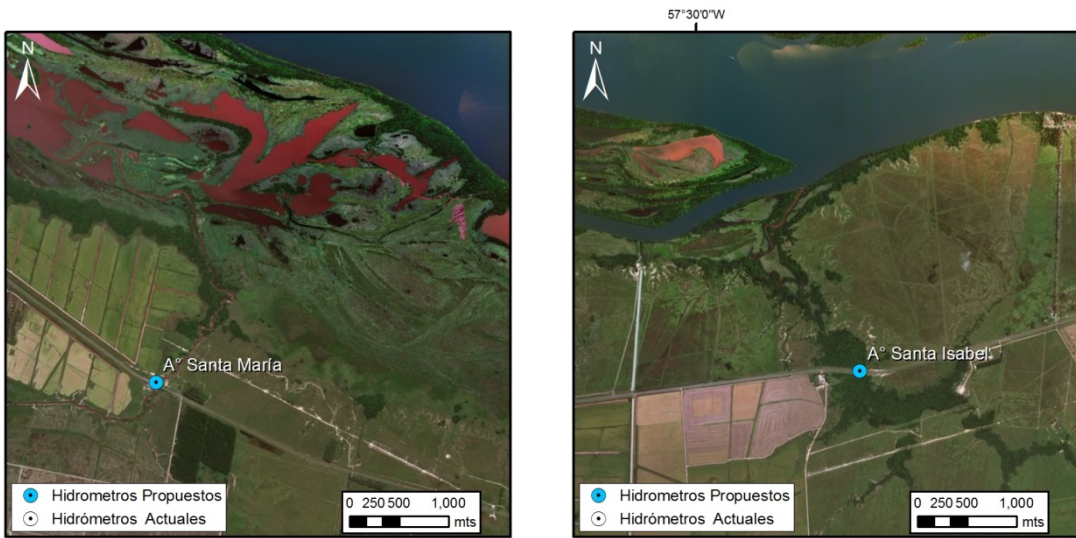
b) ‘Alternativa 2’



c) ‘Yahapé’

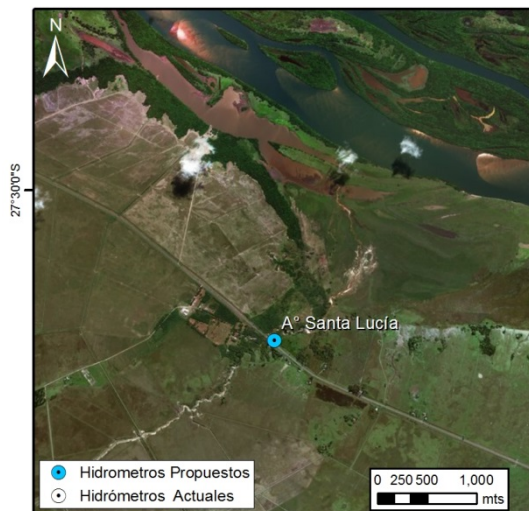


d) ‘Iribí Cuá’



e) 'Santa María'

f) 'Santa Isabel'



g) 'Santa Lucía'

Figura 7.3. Detalle de ubicación de hidrómetros propuestos.

8 CONCLUSIONES

A continuación se presentan las principales conclusiones de los estudios.

Sobre áreas inundadas:

- El cierre Itatí-Itacorá generará áreas permanentemente inundadas. Si bien estas representarán un espejo de agua significativo para condiciones hidrológicas normales, sólo significarán un incremento relativamente pequeño respecto de las áreas inundadas temporariamente durante las crecidas del río Paraná.
- Las alternativas de obra con cierre lateral reducirían apreciablemente las áreas inundadas sobre la margen derecha respecto de las alternativas sin cierre lateral. Más aún, en condiciones de crecida del río Paraná aquellas evitarían la inundación temporaria de algunas zonas respecto de lo que sucedería en condiciones naturales.
- Se han cuantificado las áreas inundadas para cada escenario, discriminándolas por zonas.

Sobre efectos hidráulicos:

- Los perfiles longitudinales de nivel del río Paraná para un dado caudal, siguiendo eventualmente el Brazo Principal, son similares entre los correspondientes a distintas alternativas de obra para la misma cota de retenida.
- La presencia del cierre Itatí-Itacorá impactará sobre el nivel de restitución de Yacyretá en el Brazo Principal. Para el caudal medio habría una sobrelevación de aproximadamente 0.75 m para la cota de embalse 59 m, y de 1.75 m para la cota 61 m. En el caso del caudal máximo considerado (45.000 m³/s) estas sobrelevaciones se reducirían a 0.40 m y 0.75 m, respectivamente.
- No habría efecto de remanso al pie del vertedero Aña Cuá debido a la relativamente alta pendiente del Brazo Aña Cuá.
- Se estima que los aforos de caudal para grandes crecidas en la sección Itatí-Itacorá adolecen de una subestimación sistemática. Se considera que la curva altura-caudal más confiable para la escala de Itatí es la que surge del ajuste a los resultados del modelo MOAGAB, por lo que se la tomó como curva clave en Itatí-Itacorá para este estudio.
- Utilizando el modelo hidrodinámico unidimensional se determinaron las curvas clave para la sección Itatí y para las secciones de los dos cierres propuestos, en el rango de caudales desde 10.000 m³/s hasta 95.000 m³/s, con paso cada 5.000 m³/s.

- Utilizando la serie temporal de niveles registrados en la estación Itatí, convertida a serie de caudales mediante la curva clave, se obtuvieron los caudales pico asociados a distintos períodos de recurrencia.
- Utilizando la misma serie, se construyeron curvas de permanencia de los caudales diarios para distintas ventanas de tiempo: una completa y dos parciales cada vez más concentradas hacia el presente. La permanencia de caudales se ha venido incrementado para caudales inferiores a aproximadamente 15.000 m³/s, producto de la regulación en el río impuesta por la cadena de embalses brasileños y, en menor medida, por la de Yacyretá. Además, se observa una mayor permanencia para la ventana completa que para las ventanas parciales.
- Se utilizó el modelo hidrodinámico unidimensional para determinar relaciones caudal-nivel para distintas localidades ubicadas aguas abajo de Yacyretá afectadas por el embalse Itatí-Itacorá a cota 59 m y cota 61 m. La sobreelevación producida por el embalse es mayor cuanto más cercana es la población al eje de la presa, y cuanto más bajo es el caudal. Las alternativas de cierre 1A y 1B producen niveles de afectación algo superiores a los de las alternativas 2A y 2B, sobre todo para caudales altos.
- Se utilizó el modelo hidrodinámico bidimensional para construir perfiles longitudinales del nivel de agua para las condiciones naturales y la situación con presa para distintos caudales, entre 14.750 m³/s y 45.000 m³/s, a lo largo de los 3 brazos del río Paraná: brazo Principal, brazo San José Mí y brazo Aña Cuá. Los niveles en la restitución del Vertedero del Brazo Aña Cuá no se ven influenciados por los niveles de la presa de Itatí (no hay efectos de remanso).
- Se utilizó el modelo bidimensional para completar el cálculo del efecto de Itatí-Itacorá sobre la restitución de la Central de Yacyretá, para niveles de embalse entre 59.0 m y 61.0 m, cada 0.5 m.
- Se utilizó el modelo hidrodinámico unidimensional para determinar los perfiles longitudinales asociados a la CMP correspondiente a las distintas alternativas de cierre, considerando la situación de laminación y de no laminación del embalse de Itatí-Itacorá.
- Se realizó una estimación de la distribución lateral de velocidades y caudales específicos en las secciones de ambas alternativas de cierre, utilizando un modelo unidimensional de distribución lateral.

Sobre erosión por olas:

- El cierre Itatí-Itacorá generará un embalse sobre el cual se desarrollarán olas por la acción del viento. Estas impactarán sobre las márgenes, ejerciendo una acción potencialmente erosiva.
- Las olas con mayor altura que incidirían sobre la obra de cierre provendrían de las direcciones E y S. Sobre la margen derecha el oleaje más severo resultaría de los vientos de dirección S. Por su parte, para la margen izquierda las mayores alturas de ola serían generadas por vientos de las direcciones NE, ENE y E.

- Se identificaron 5 secciones costeras críticas, 3 sobre la margen izquierda y 2 sobre la margen derecha del embalse, donde la exposición al efecto de las olas es mayor. Para las secciones sobre margen izquierda se estimaron tasas de recesión de entre aproximadamente 0,25 y 0,45 m/año, mientras que para las de margen derecha las tasas estimadas van desde casi cero hasta aproximadamente 0,35 m/s.
- Se utilizó el modelo de olas para completar la predicción de la agitación para las diferentes alternativas de cierre del embalse. Específicamente, se obtuvieron los valores máximos de altura de ola $H_{1/10}$ y su respectivo período de pico T_p para cada tramo del cierre (Tramo Norte-Sur y Tramo Este Oeste) y para las márgenes derecha e izquierda del embalse. Si bien las alturas de ola máximas no difieren sustancialmente entre las cuatro configuraciones de cierre analizadas, los valores correspondientes a la alternativa 1B serían los más elevados.
- Se dispuso de registros de vientos de la Torre de Medición Eólica de San Cosme. De su análisis surge que existe una compatibilidad razonable entre estos y los de la estación Posadas, utilizados en el estudio.
- Se utilizó el modelo de olas para cuantificar la agitación que se produciría en el embalse de Itatí-Itacorá bajo la acción del temporal ocurrido el 25 de abril de 2017, para las distintas alternativas de cierre. Resultó una permanencia de olas de al menos 5 horas con alturas significativas superiores a 1.0 m. La máxima altura de ola esperable sobre el cierre del embalse corresponde a la alternativa 1B, con $H_{1/10} = 1.77$ m y período de pico de $T_p = 4.05$ s.
- Evaluaciones de erosión costera en el embalses de Itaipú debido a la acción del oleaje indican tasas entre un máximo de 2,33 m/año y un mínimo de 0,51 m/año, valores que resultan compatibles con los estimados para el embalse de Itatí-Itacorá mediante la aplicación del método de Elci & Work, presentados en el Primer Informe Parcial. Además, esta metodología aplicada al propio embalse de Itaipú provee tasas compatibles con las observadas.

Sobre aportes hidrológicos:

- Los aportes hidrológicos principales de escurrimiento al embalse de Itatí – Itacorá por la margen derecha son el Arroyo Aguapey (zona MD V), el Arroyo Atinguy (zona MD IV), el Arroyo Jaguarú (zona MD III) y el Arroyo Yabebyry (zona MD II). Adicionalmente, en el sector oeste se desarrollan varias cuencas de llanura de menor superficie (las cuales se han agrupado como zona MD I).
- A partir de las series temporales de precipitación diaria en las estaciones de Encarnación y Pilar, se determinaron valores de intensidad de precipitación para distintos períodos de retorno asociados a tormentas de 24 y 48 horas de duración, las cuales fueron utilizadas para determinar hidrogramas de aporte de las distintas cuencas, de acuerdo a sus tiempos de concentración.
- Análogamente, se obtuvieron hidrogramas a pie de presa para las alternativas de cierre 1B y 2B. Los caudales pico son parámetros de diseño para el canal a pie de presa.
- Los hidrogramas por subcuenca de aporte al embalse de Itatí-Itacorá desde margen izquierda para los períodos de retorno de 5, 10 y 50 años muestran caudales pico máximos de aproximadamente 30 m³/s, 40 m³/s y 65 m³/s, respectivamente.

Sobre sedimentación:

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

Sobre erosión de fondo:

- La construcción de la presa de Itatí-Itacorá cortará el transporte de material de fondo (arenas) desde aguas arriba, pudiendo potencialmente generar erosión de fondo en la restitución de la presa.
- Probablemente el lecho del Alto Paraná haya alcanzado un estrato consolidado que impide su profundización bajo la acción de los esfuerzos de corte asociados a las condiciones hidrodinámicas del río.
- No obstante, no puede descartarse que la situación sea de mayor riesgo, por lo cual se determinó cómo se profundizaría el río si el supuesto estrato consolidado se comportara como material suelto no consolidado. El descenso esperado del lecho en la restitución luego de 100 años sería de aproximadamente 10 metros para la Alternativa 1 y de 13 metros para la Alternativa 2. Una tal erosión al pie atentaría contra la estabilidad de la presa, de modo que resulta vital efectuar estudios de suelo que corroboren que existe un estrato consolidado capaz de resistir a la erosión.
- El puente sobre el arroyo Iribú Cuá perteneciente a la Ruta Nacional 12, que se desmoronó el 18 de mayo de 2017, recibe aguas arriba descargas de dos grandes canalizaciones, de aproximadamente 10 km de longitud cada una. El puente había estado sometido a un evento extremo significativo (de alrededor de 5 años de recurrencia) aproximadamente 1½ meses antes de la falla, seguido de una solicitud

extraordinaria (de aproximadamente 50 años de recurrencia) luego de alrededor de 2 semanas (casi 1 mes antes de su falla). La última precipitación relevante antes de la falla (con una recurrencia de alrededor de 2 años) ocurrió aproximadamente 5 días antes. De modo que es lógico pensar que se produjeron procesos de erosión local acumulativos que condujeron al colapso del puente, quizás con un mantenimiento insuficiente. Además, la altura de agua en el arroyo para el evento de 50 años de recurrencia es del orden de la altura del puente, de modo que no puede descartarse que haya habido un sobrepaso el 24/25 de abril, que debilitó el estribo de margen derecha.

Sobre el clima:

- Se han efectuado estadísticas de datos climáticos, a saber, temperaturas máxima, mínima y media, presión atmosférica, precipitación, humedad relativa, heliofanía, velocidades máximas y medias del viento. También se ha llevado a cabo un balance hídrico del embalse que, más allá de incertidumbres de acuerdo al método de cálculo, indica un relativo equilibrio.

Sobre navegación:

- La construcción del embalse de Itatí-Itacorá producirá cambios en las condiciones de navegabilidad. Generaría una reducción de la velocidad de la corriente en todo el tramo entre las dos presas. En el caso de caudales medios la reducción sería del orden del 50%, variación relativa que decrecería a medida que aumenta el caudal, llegando a alrededor del 10% para situaciones de crecida extraordinaria. La disminución de velocidad durante crecidas extraordinarias podría significar una navegación más segura en esas condiciones.
- Simultáneamente, habría un incremento de los tirantes para el tramo entre las dos presas, de hasta el 70% para caudales medios, que se reduce al 20% para crecidas extraordinarias. Esos aumentos llegan a 8 m y 10 m para cotas de embalse de 59 m y 61 m, respectivamente, en el caso de caudal medio, y a valores de 3.3 m y 5.3 m en el caso del caudal de crecida extraordinaria. Obviamente, estos incrementos van en el sentido de una navegación más segura.
- El empuntamiento de las centrales producirá oscilaciones diarias de la velocidad. En el tramo entre presas la amplitud de la oscilación de la velocidad sería mayor sin proyecto hasta algo más de 25 km aguas abajo de Yacyretá. En este subtramo la amplitud sería entre aproximadamente 5% y 35% menor para el embalse a cota 59 mIGN, y entre 20% y 50% menor para el embalse a cota 61 mIGN. Luego la relación sería inversa, ya que la amplitud se tornaría mayor en las situaciones de proyecto, pasando de incrementos de entre aproximadamente 10% y 20% a 50 km aguas abajo de Yacyretá hasta factores de amplificación de entre 20 y 25 a 150 km aguas abajo de Yacyretá.
- El empuntamiento de Itatí-Itacorá afectará las condiciones de navegabilidad aguas abajo del cierre. En particular, se incrementarían las velocidades máximas, alcanzándose un valor ligeramente superior al correspondiente a un caudal medio en condiciones actuales, pero inferior al asociado a una crecida extraordinaria.
- Para condiciones de caudal bajo, el empuntamiento de Itatí-Itacorá resultaría en una mejora de las condiciones de navegabilidad también en el tramo entre Confluencia y el aprovechamiento. En efecto para una embarcación restringida actualmente para la navegación por altas velocidades, con el proyecto se podría aprovechar las horas del día con caudal relativamente bajo para realizar la navegación. Si, por el contrario, el

calado en ese tramo resultara restrictivo, la embarcación podría realizar la navegación durante las horas del día en que se turbinan el caudal pico.

Sobre erosión por corrientes:

- La construcción del embalse también conduciría a una disminución significativa de las tensiones de corte en el tramo entre ambos cierres. En el caso de un caudal medio, las reducciones serían de entre 85% y 90%. Para una crecida extraordinaria, esas reducciones serían de entre 10% y 25% para el embalse a cota 59 mIGN, y de entre 25% y 40% para el embalse a cota 61 mIGN.
- De la disminución de las tensiones de corte para la situación con proyecto se infiere que los procesos de acarreo serían mucho menos significativos en el tramo entre Yacyretá e Itatí-Itacorá. No obstante, debe tenerse en cuenta que probablemente el lecho del río Paraná en ese tramo ya ha alcanzado un estrato consolidado que impide su erosión bajo la acción de los esfuerzos de corte asociados a las condiciones hidrodinámicas del río, de modo que el acarreo incluso puede ser muy poco significativo en las condiciones actuales.
- El empuntamiento de la central de Itatí-Itacorá conduciría a un aumento de las tensiones de corte máxima sobre las márgenes en relación a la situación sin proyecto. El valor pico de estas tensiones máximas sería del mismo orden que el correspondiente a condiciones de crecida extraordinaria. Si bien esto significa que el empuntamiento no produciría sobre las márgenes tensiones de corte mayores en magnitud que las ya experimentadas durante esos eventos extraordinarios, también indica que esas tensiones de corte incrementadas actuarían con una frecuencia mucho mayor (diaria), lo cual puede incrementar el peligro de erosión.

Sobre la red hidrométrica:

- La red hidrométrica instalada en el área de influencia del embalse de Itatí cuenta con una instalación suficiente para el monitoreo del río Paraná en las condiciones sin proyecto.
- Para avanzar con el proyecto de presa de Itatí-Itacorá se considera necesario instalar instrumental hidrométrico adicional, el cual permitiría tanto mejorar el diseño de la obra como asistir en una operación más eficiente.
- Se recomienda para la escala de Itatí realizar aforos en época de crecidas a fin de verificar la curva altura-caudal, poniendo énfasis en las mediciones de caudal sobre la planicie de margen derecha.
- Para ser de utilidad al diseño de Itatí-Itacorá se debería contemplar la instalación de nuevos hidrómetros sobre el río Paraná, y también en cursos afluentes a su embalse que permitan cuantificar los aportes laterales. Algunos hidrómetros cumplirían con funciones de relevancia previa a la construcción del aprovechamiento, que se tornarían secundarias luego de su construcción, pudiendo eventualmente ser relocalizados.
- En todos los casos se recomienda sensores automáticos que tengan la capacidad de almacenar la información y si es posible transmitir en tiempo real.
- Sobre todos los afluentes deberían realizarse campañas de aforo de caudal, y estimar el efecto de remanso del embalse sobre ese curso de agua para analizar la posibilidad de construir curvas altura-caudal.

9 REFERENCIAS

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

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

Banco Mundial & MAG-Paraguay. (1995). Proyecto de Racionalización del Uso de la Tierra. Asunción, Paraguay: Banco Mundial & Ministerio de Agricultura y Ganadería de Paraguay.

Booij, N., R.C. Ris, and L.H. Holthuijsen, (1999), A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation, J. Geophys. Res., 104(C4), 7649–7666, doi:10.1029/98JC02622.

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

COMIP (1984). Memorias internas de la COMIP de Planificación y Cálculo para su Departamento Técnico.

COMIP (1986). Aprovechamiento del Río Paraná, Tramo Yacyretá – Confluencia. Proyecto Hidroeléctrico de Propósitos Múltiples. Emplazamiento en la zona Itatí Itacorá. Borrador del Informe Preliminar. Tomo II. Descripción. Agosto 1986.

Cuevas, L., Rolón, A., (2010). Actualización de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia de precipitación en el Paraguay. Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción.

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

Dunne, T & Leopold, L.B., (1978). Water in Environmental Planning. San Francisco: Freeman and Co.

Elci, S., Work, P.A., (2003). Prediction of Reservoir Shoreline Erosion. Proceedings of the 2003 Georgia Water Resources Conference. University of Georgia, Athens, Georgia.

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

García, P.E., Re, M., Latessa, G. (2012). Modelo Hidrodinámico del Río Paraná para Pronóstico Hidrológico: Evaluación de Performance, Actualización y Extensión de su Aplicación. 2° Informe: Evaluación de Performance del Modelo, INA 01-336-12.

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

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

Heck, M., Fariza, S., De Lucia, A., Blaschik, J., (2017). Caracterización agronómica preliminar de cultivares comerciales de sorgo granífero de la EEA Cerro Azul. Campaña 2014/2015. Informe Técnico INTA N° 99/2017.

IGN (2018). Relevamiento Aerofotogramétrico del Río Paraná. Tramo Binacional Itatí – Complejo Hidroeléctrico Yaciretá. Trabajo desarrollado para la Comisión Mixta Argentino-Paraguaya del Río Paraná (COMIP). Instituto Geográfico Nacional.

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

INA (2013). Estudio de Impacto de Fallas de Yacyretá para el PAE (Plan de Acción Frente a Emergencias). 4° Informe Parcial: Simulación de Escenarios de Base. LHA 04-332-12.

INA (2015a). Estudio de Impacto de Fallas de Yacyretá para El PAE (Plan de Acción ante Emergencias), Etapa II, Segundo Informe Parcial. Proyecto LHA 353, Informe LHA 02-353-15, Ezeiza, Abril.

INA (2015b). Medición y pronóstico de olas en el Embalse de Yacyretá. Informe de avance N°1, LHA-213-09-15.

ITAIPU (2017). Levantamiento Batimétrico Río Paraná. Tramo Yacyretá – Paso de la Patria. Itaipú.

Jaime, P., Menéndez, A.N., (1997). Modelo hidrodinámico del río Paraná desde Yacyretá hasta la ciudad de Paraná. Informe INA-LHA 165-01-97.

Jaime, P., Menéndez, A.N., UriburuQuirno, M., (2000). Modelo hidrodinámico del Río Paraná para pronóstico hidrológico. XVIII Congreso Nacional del Agua, CONAGUA 2000, Termas de Río Hondo.

Meyer, A. F., (1944). Evaporation from Lakes and Reservoirs. Minnesota Resources Commission, St. Paul.

Motor Columbus y Asoc. (1979). Estudio de crecidas ríos Paraguay y Paraná –Modelo Hidrodinámico, Volumen 3B.

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

NRCS (2002). Part 630. Hydrology. National Engineering Handbook. Washington D.C.

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

Penman, H.L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Royal Soc., London, Series A, 193: 120-145

Proyecto Yacyretá (1980). Contrato Y–CI –Construcción de las Principales Obras Civiles – Circulares.

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

Shore Protection Manual (1984). Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.

TR-55 (1986). Urban Hydrology for Small Watersheds. Natural Resources Conservation Service – United States Department of Agriculture.

Tucci, C. (1993). Hidrología - Ciencia y Aplicación. Porto Alegre, Brasil: UFRGS/ABRH.

USDA - NRCS. (2009). National Engineering Handbook (Chapter 7: Hydrologic Soil Group). Washington D.C.: United States Department of Agriculture (USDA).

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

Viessman, Jr. & Lewis, W. (2003). Introduction to Hydrology. Prentice Hall, Fifth Edition

Weber, J.F., Menéndez, A.N., Tarrab, L., (2005). Distribución Lateral de Velocidades en Cauces Naturales, Ingeniería del Agua, Vol. 12, N° 3, Setiembre, 277-289.

ANEXO: MODELOS CONCEPTUALES Y PARÁMETROS UTILIZADOS EN HEC-HMS

En las siguientes figuras las subcuencas se representan con la letra S seguida del número de subcuenca. Una línea fina indica dónde la subcuenca se conecta directamente, y una línea gruesa azul indica los tramos de ríos a través de los cuales se simula el proceso de tránsito. Este proceso de tránsito es particularmente importante en esta zona, donde se tienen extensas planicies y humedales asociados a los cauces, en los cuales se produce un significativo efecto de laminación.

a) MD I – Cuencas de Llanura

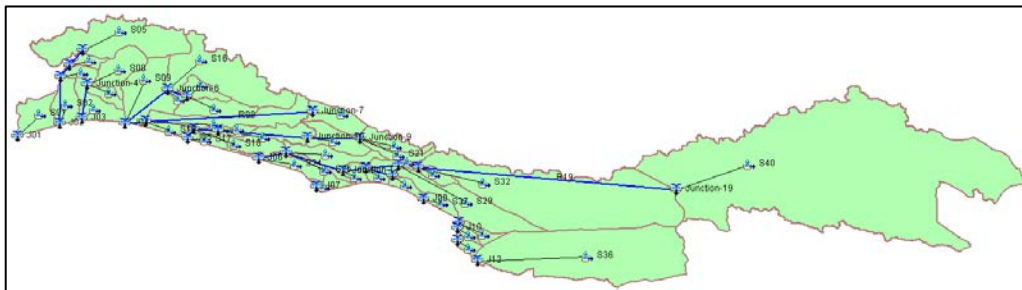


Figura 0.1. Esquema de Modelación MD I (Cuenca de Llanura).

Tabla 0.1. Parámetros utilizados en Cuenca MD I.

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	CN	L (m)	Pendiente (%)	K	Tc (hr)	Tlag (min)
MD I - Oeste	01	13.02	80	6552	0.075	2.0	11.7	421
MD I - Oeste	02	11.76	80	6964	0.098	2.0	10.3	372
MD I - Oeste	03	4.59	79	4276	0.041	2.0	10.0	361
MD I - Oeste	04	3.95	71	3512	0.126	2.0	5.9	211
MD I - Oeste	05	49.28	82	12271	0.029	3.8	15.2	548
MD I - Oeste	06	12.83	75	5615	0.120	2.0	9.4	338
MD I - Oeste	07	5.05	76	3420	0.055	2.0	8.8	316
MD I - Oeste	08	15.80	69	6020	0.048	2.0	14.6	525

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	CN	L (m)	Pendiente (%)	K	Tc (hr)	Tlag (min)
MD I - Oeste	09	27.86	69	11594	0.038	2.0	21.6	777
MD I - Oeste	10	5.17	80	6738	0.091	2.0	8.3	297
MD I - Oeste	11	23.68	75	19043	0.019	2.0	30.0	1081
MD I - Oeste	12	12.46	75	5572	0.080	2.0	10.9	392
MD I - Oeste	13	1.42	74	2357	0.134	2.0	3.9	140
MD I - Oeste	14	14.14	75	7867	0.040	2.0	16.0	577
MD I - Oeste	15	7.08	65	4959	0.111	2.0	7.8	281
MD I - Oeste	16	49.27	66	16418	0.020	2.1	34.7	1248
MD I - Oeste	17	4.47	80	4966	0.060	2.0	8.8	316
MD I - Oeste	18	10.90	80	10967	0.036	2.0	16.6	597
MD I - Oeste	19	12.25	76	10448	0.034	2.0	17.2	621
MD I - Oeste	20	13.48	77	7378	0.071	2.0	12.4	447
MD I - Oeste	21	6.24	78	6672	0.055	2.0	10.6	383
MD I - Oeste	22	9.34	71	6295	0.094	2.0	9.6	345
MD I - Oeste	23	3.27	80	4178	0.254	2.0	4.3	156
MD I - Oeste	24	9.39	80	7535	0.124	2.0	8.9	321
MD I - Oeste	25	5.21	80	7156	0.081	2.0	8.8	316
MD I - Oeste	26	15.44	80	11479	0.024	2.0	21.7	783
MD I - Oeste	27	4.73	80	3308	0.207	2.0	5.0	181
MD I - Oeste	28	3.80	80	4788	0.082	2.0	7.3	264
MD I - Oeste	29	30.47	77	18435	0.010	2.0	40.9	1471
MD I - Oeste	30	1.65	80	2224	0.085	2.0	4.8	174
MD I - Oeste	31	4.47	75	4150	0.112	2.0	6.6	238
MD I - Oeste	32	126.46	82	37199	0.014	3.5	36.7	1320
MD I - Oeste	33	4.14	89	4829	0.115	3.9	3.4	122
MD I - Oeste	34	2.28	95	2276	0.167	5.0	1.6	59
MD I - Oeste	35	3.41	94	3167	0.149	5.0	2.1	74

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	CN	L (m)	Pendiente (%)	K	Tc (hr)	Tlag (min)
MD I - Oeste	36	106.73	90	27579	0.012	4.4	27.8	1002
MD I - Oeste	37	4.72	80	4647	0.115	2.0	6.8	245
MD I - Oeste	38	1.68	80	2092	0.349	2.0	2.7	98
MD I - Oeste	39	7.58	80	3455	0.096	2.0	7.9	286
MD I - Oeste	40	372.70	92	48005	0.018	3.8	44.1	1587

a) MD II – Arroyo Yabebyry

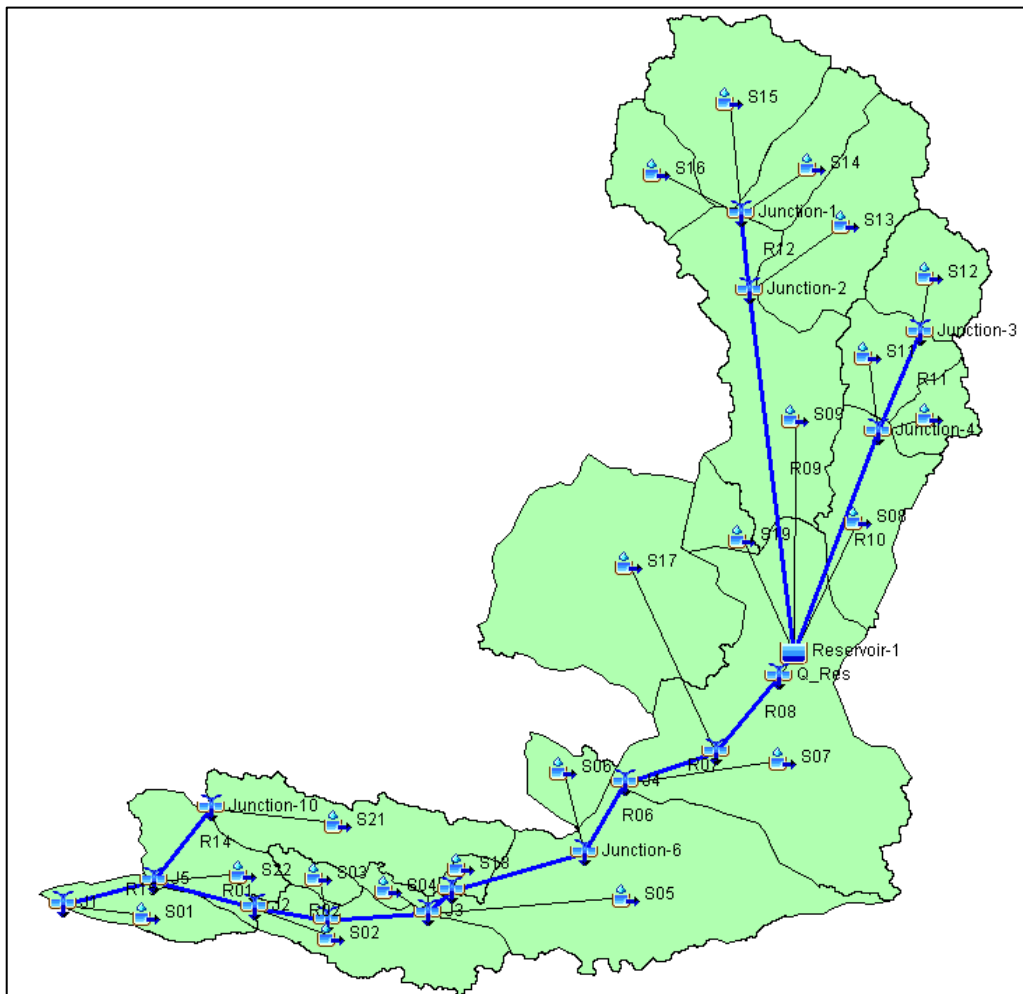


Figura 0.2. Esquema de Modelación MD II (Arroyo Yabebyry).

Tabla 0.2. Parámetros utilizados en Cuenca MD II – Arroyo Yabebyry.

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	CN	L (m)	Pendiente (%)	K	Tc (hr)	Tlag (min)
MD II - Yabebyry	01	36.76	80	12245	0.010	2.2	37.2	1338
MD II - Yabebyry	02	73.76	76	19252	0.039	2.1	30.2	1087
MD II - Yabebyry	03	12.98	64	6134	0.076	2.0	11.5	413
MD II - Yabebyry	04	8.19	73	5774	0.032	2.7	10.2	369
MD II - Yabebyry	05	207.19	85	43328	0.022	3.4	37.6	1355
MD II - Yabebyry	06	25.83	90	7787	0.019	3.7	14.0	505
MD II - Yabebyry	07	272.73	79	34063	0.026	3.5	35.0	1261
MD II - Yabebyry	08	71.82	83	10989	0.094	3.4	11.7	421
MD II - Yabebyry	09	148.69	89	30655	0.066	3.5	19.6	707
MD II - Yabebyry	10	24.49	86	6827	0.607	3.2	3.8	137
MD II - Yabebyry	11	44.21	87	9079	0.358	3.3	5.8	210
MD II - Yabebyry	12	51.51	86	7641	0.391	3.2	5.8	211
MD II - Yabebyry	13	100.12	86	18932	0.305	3.2	9.6	344
MD II - Yabebyry	14	48.42	85	14058	0.335	3.2	7.1	254
MD II - Yabebyry	15	104.23	87	15815	0.277	3.6	8.6	309
MD II - Yabebyry	16	42.24	88	12187	0.336	4.0	5.2	186
MD II - Yabebyry	17	206.24	91	21472	0.006	4.0	46.8	1686
MD II - Yabebyry	18	8.72	74	6425	0.015	2.7	14.6	525
MD II - Yabebyry	19	21.68	85	7089	0.023	3.5	12.9	463
MD II - Yabebyry	21	92.08	89	25094	0.029	3.6	22.2	801
MD II - Yabebyry	22	54.88	86	10533	0.045	3.7	13.1	471

b) MD III y IV – Arroyo Jaguary y Atinguy

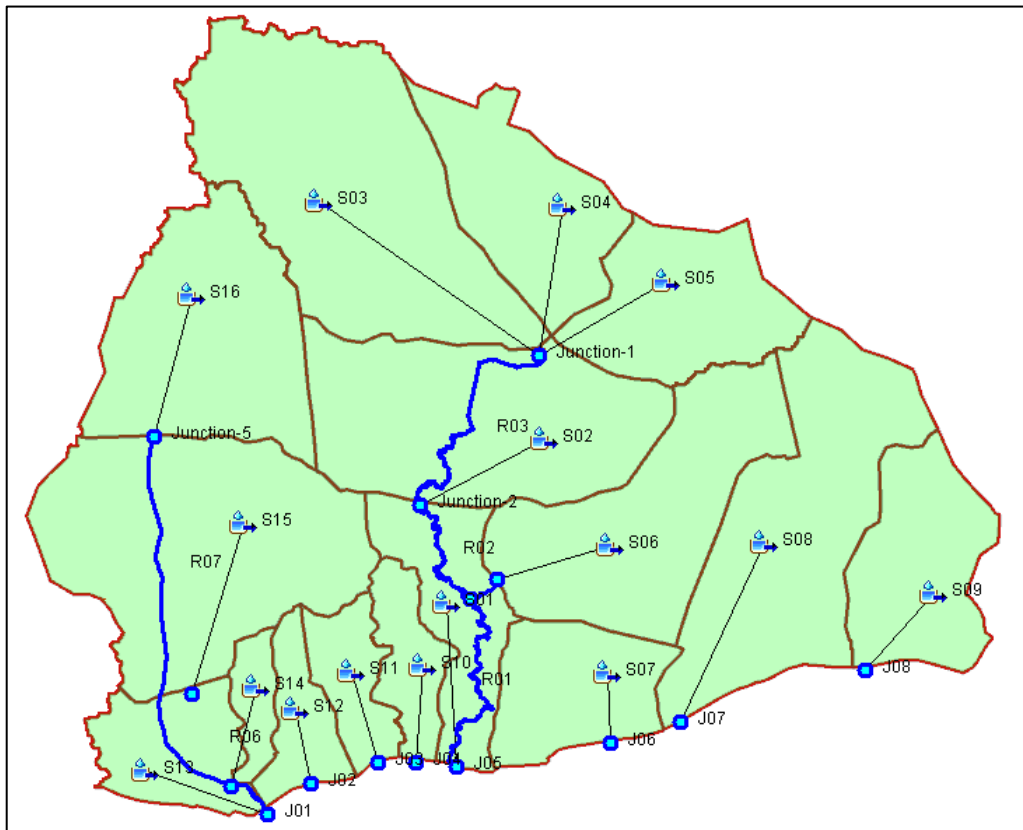


Figura 0.3. Esquema de Modelación MD III y IV (Arroyo Jaguary y Atinguy).

Tabla 0.3. Parámetros utilizados en Cuenca MD III y IV – Arroyo Jaguary y Atinguy.

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	CN	L (m)	Pendiente (%)	K	Tc (hr)	Tlag (min)
MD III y IV	01	64.14	88	32218	0.033	2.9	25.0	901
MD III y IV	02	161.27	90	19239	0.039	3.2	25.1	904
MD III y IV	03	210.22	87	28922	0.138	3.2	17.6	632
MD III y IV	04	85.86	86	17324	0.176	3.1	11.7	420
MD III y IV	05	84.19	88	12161	0.143	3.3	11.0	397
MD III y IV	06	133.56	89	22056	0.101	3.0	17.7	636
MD III y IV	07	63.16	89	9106	0.014	2.9	27.0	972
MD III y IV	08	159.89	88	28000	0.087	3.2	19.6	706
MD III y IV	09	80.79	88	11874	0.254	3.4	8.2	294
MD III y IV	10	31.77	88	10319	0.039	2.8	15.3	551

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	CN	L (m)	Pendiente (%)	K	Tc (hr)	Tlag (min)
MD III y IV	11	31.69	87	8063	0.030	2.8	16.2	582
MD III y IV	12	29.90	86	9779	0.020	3.0	18.4	663
MD III y IV	13	50.81	91	11292	0.014	3.6	21.4	771
MD III y IV	14	16.98	88	8035	0.014	3.9	13.4	482
MD III y IV	15	192.96	85	14537	0.012	3.9	32.5	1170
MD III y IV	16	132.23	87	17069	0.241	3.2	11.2	405

c) MD V – Arroyo Aguapey

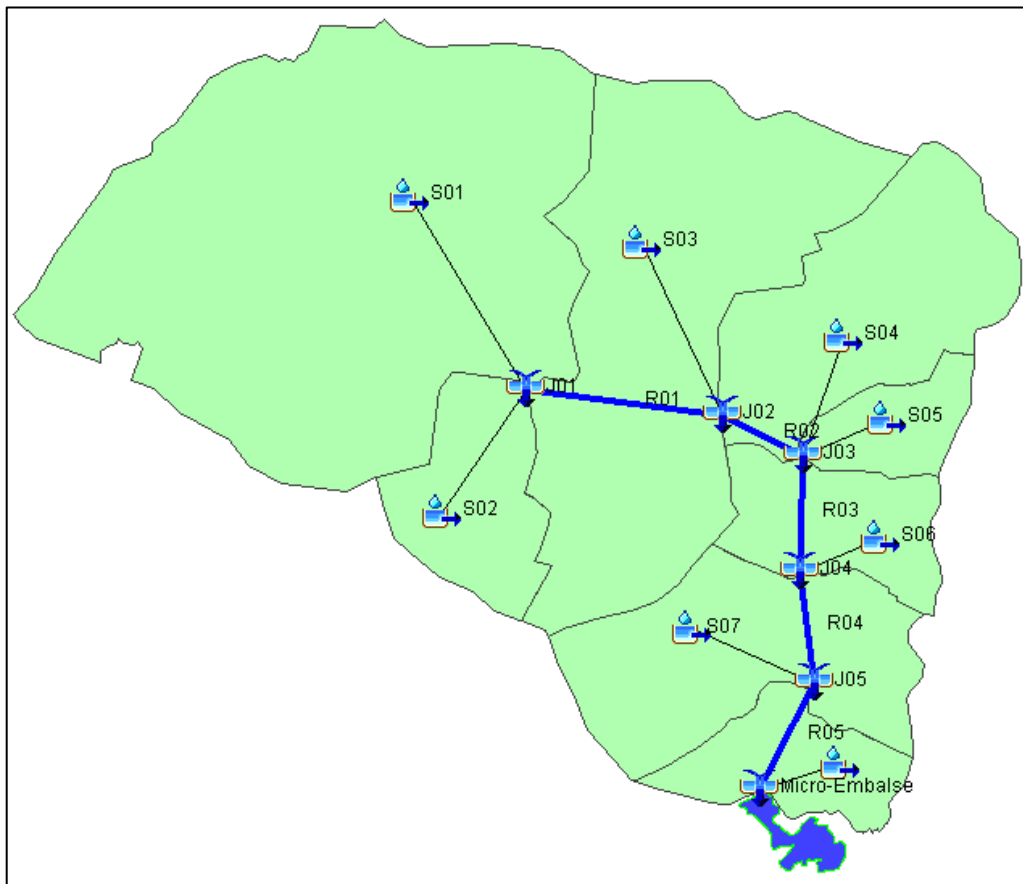


Figura 0.4. Esquema de Modelación MD V (Arroyo Aguapey).

Tabla 0.4. Parámetros utilizados en Cuenca MD V – Arroyo Aguapey.

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)	CN	L (m)	Pendiente (%)	K	Tc (hr)	Tlag (min)
MD V - Aguapey	01	532.93	76	36119	0.103	3.0	29.5	1060
MD V - Aguapey	02	80.03	79	16430	0.104	3.4	12.7	457
MD V - Aguapey	03	318.40	76	21653	0.056	3.1	28.2	1016
MD V - Aguapey	04	153.29	79	33494	0.070	3.4	20.7	745
MD V - Aguapey	05	39.96	81	11850	0.264	3.5	6.4	231
MD V - Aguapey	06	71.25	78	13431	0.354	3.3	7.4	266
MD V - Aguapey	07	154.53	81	19749	0.150	3.5	13.3	478
MD V - Aguapey	08	60.91	76	10753	0.325	3.1	7.3	264