



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

Primer Informe Parcial



Proyecto LHA370
Informe LHA 03-370-17
Ezeiza, Diciembre de 2017

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Ing. Julio C. DE LÍO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO (Orden alfabético)

INA

Ing. Nicolás D. BADANO

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

Ing. Emilio LECERTÚA

Ing. Nicolás TOMAZÍN

Paraguay

Ing. Mag. Cristian ESCOBAR JARITÓN

Ing. Benito PEREIRA

ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO ITATÍ-ITACORÁ

Primer Informe Parcial

RESUMEN

Se presentan resultados sobre los efectos de remanso provocados por la construcción del cierre Itatí-Itacorá. Se analiza en detalle la curva clave en la sección Itatí-Itacorá, que relaciona el caudal pasante con el nivel hidrométrico. Se cuantifica el oleaje generado por los vientos y su potencial efecto erosivo sobre las márgenes. Se presentan resultados preliminares sobre aportes hidrológicos desde la margen izquierda del río Paraná.

Descriptores temáticos: Modelo hidrodinámico. Mapas de inundación. Curvas altura-caudal. Olas en embalse. Erosión de márgenes.

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

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	EFFECTOS DE REMANSO	5
2.1	Metodología de cálculo	5
2.2	Escenarios de obra	9
2.3	Productos	10
2.3.1	Áreas inundadas	10
2.3.2	Perfiles Longitudinales	18
2.3.3	Efecto sobre la relación altura-caudal en la restitución de Yacyretá	22
3	CURVA CLAVE EN ITATÍ-ITA CORÁ	28
3.1	Escala hidrométrica de Itatí	28
3.1.1	Ubicación	28
3.1.2	Curvas altura-caudal	28
3.1.3	Cero de escala	30
3.2	Análisis	31
3.2.1	Aforos	31
3.2.2	Modelo MOAGAB	32
3.2.3	Curva altura-caudal del modelo MOAGAB	34
3.2.4	Volumen acumulado	35
3.2.5	Conclusiones	35
4	ACCIÓN DEL OLEAJE	36
4.1	Consideraciones generales	36
4.2	Metodología de modelación del oleaje	36
4.3	Dominio de cálculo	38

4.4 Escenarios de cálculo	39
4.5 Predicción de olas	39
4.6 Metodología de cálculo de erosión potencial	45
4.7 Predicción de erosión potencial	48
4.7.1 Planteo	48
4.7.2 Resultados sobre la margen izquierda	49
4.7.3 Resultados sobre la margen derecha	51
5 APORTE HIDROLÓGICO	53
5.1 Estrategia de estudio	53
5.2 Datos de base	53
5.3 Modelación hidrológica	54
5.3.1 Software	54
5.3.2 Dominio de modelación	54
5.3.3 Implementación	54
5.3.4 Características de las subcuencas	55
5.3.5 Tormenta de diseño	56
5.3.6 Método de Pérdidas	58
5.3.7 Método de transformación Precipitación - Escorrentía	59
5.3.8 Resultados	60
6 CONCLUSIONES	63
REFERENCIAS	65

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. Tendrá un salto de aproximadamente 11,0 m, y una capacidad instalada de 2.000 MW, equipado con 39 turbinas bulbo. 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 las márgenes 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 este Primer Informe Parcial se presentan los siguientes resultados:

- En el capítulo 2 se determinan 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.
- En el capítulo 3 se efectúa un análisis para establecer la curva altura-caudal más confiable para la sección Itatí-Itacorá.
- En el capítulo 4 se analiza el clima de olas que se generará en el embalse de Itatí-Itacorá, y se lleva a cabo una estimación de la consecuente erosión potencial sobre las márgenes.
- En el capítulo 5 se determinan hidrogramas de aporte hidrológico desde la margen argentina hacia el río Paraná.
- En el capítulo 5 se vierten las conclusiones de esta fase del estudio.

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 Itabaté se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) generado durante el PAE, que incluye información topobatemétrica de detalle (**Figura 2.2**); (ii) en el sub-tramo entre Itabaté 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 2.3**).

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 2.4** presenta la comparación entre observaciones y simulación para ese período, observándose un acuerdo muy satisfactorio.

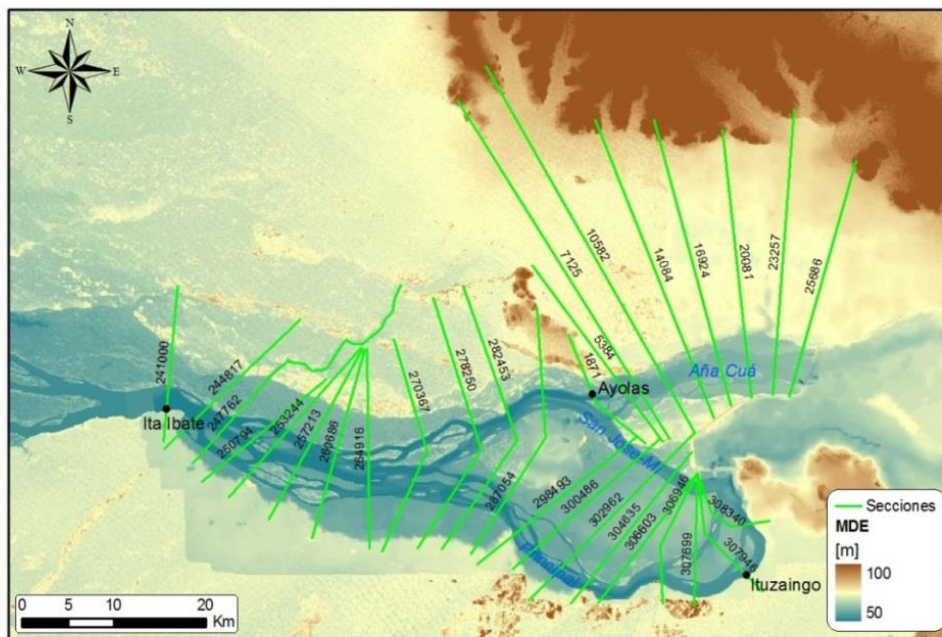


Figura 2.2. Ubicación de secciones transversales para el tramo Central – Ita Ibaté - modelo INA PAE.

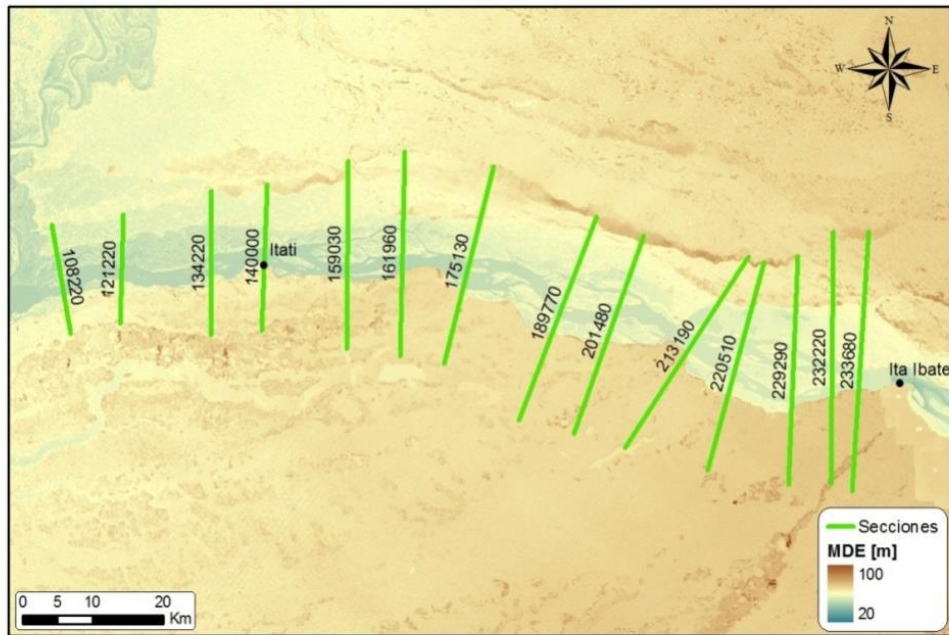
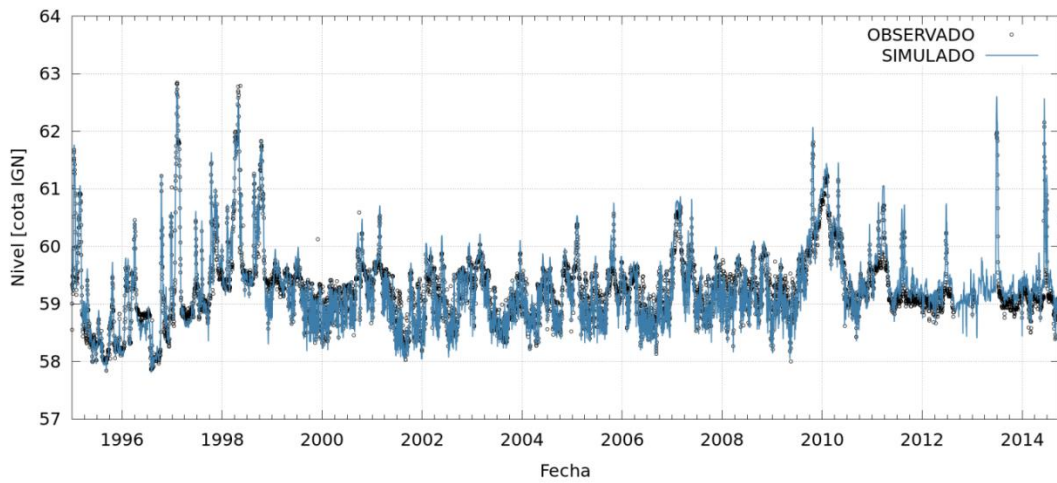
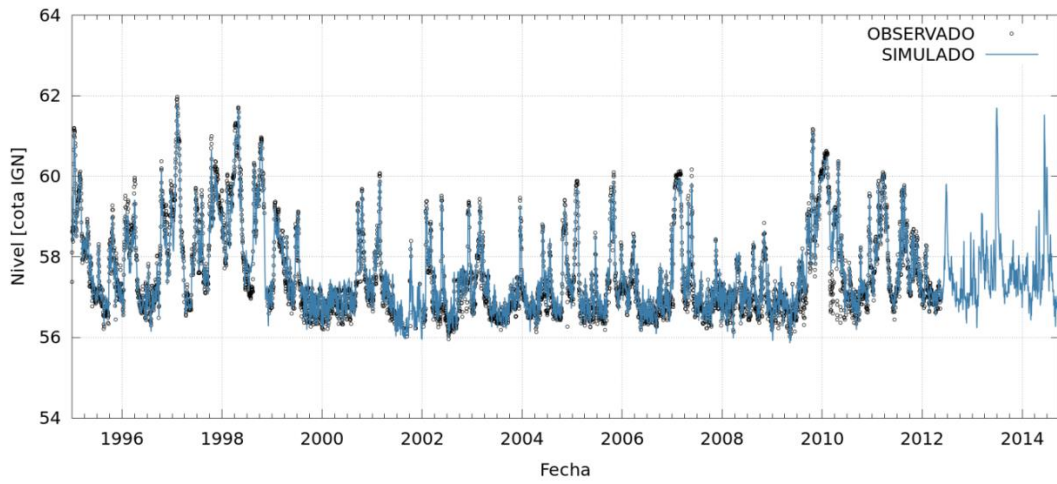


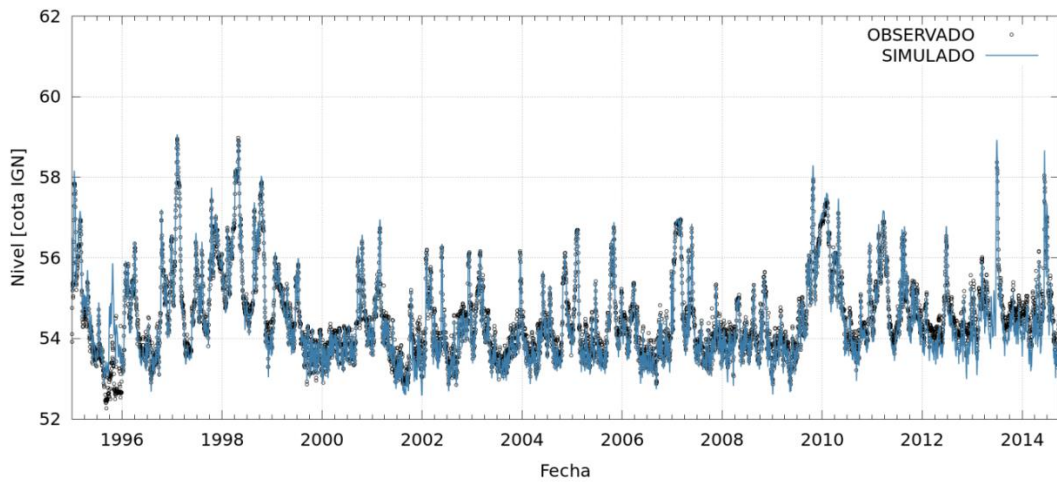
Figura 2.3. Ubicación de secciones transversales para el tramo Ita Ibaté – Confluencia.



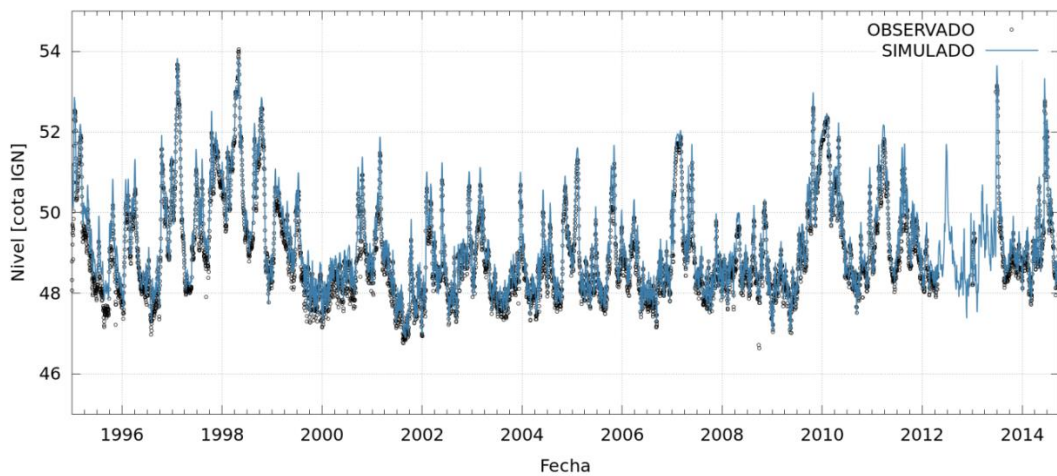
a) Ituzaingó



b) Ayolas



c) Ita Ibaté



d) Itatí

Figura 2.4. Comparación entre niveles simulados y observados con el modelo MOAGAB para la ventana de tiempo de calibración en diferentes estaciones hidrométricas.

La **Tabla 2.1** 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 2.1. 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

2.2 Escenarios de obra

Se estudiaron cuatro alternativas de cierre para Itatí-Itacorá. Las características de estos cierres se presentan en la **Tabla 2.2**. La traza de cada uno se presenta en forma gráfica en la **Figura 2.5**.

Tabla 2.2. 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

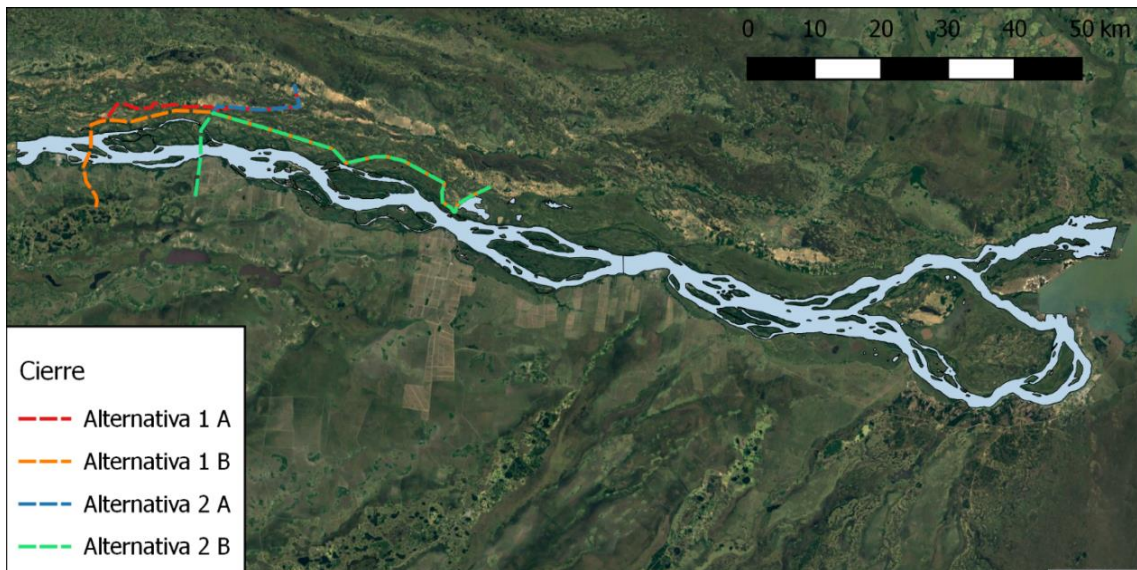


Figura 2.5. Alternativas de cierre para Itatí-Itacorá.

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.

2.3 Productos

2.3.1 Áreas inundadas

Se obtuvieron mapas de áreas de inundación mediante el procesamiento de simulaciones realizadas para dos valores de caudal, considerados constantes:

- 14.735 m³/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 2017[†].
- 45.000 m³/s. Este fue el valor estimado asociado al nivel máximo registrado en la historia de la escala hidrométrica de Posadas, en el año 1905.

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 2.3**.

[†] www.eby.org.ar/images/nm/pdfgeneracion/YacyretaCaudalesDesdelInicioOperacion.pdf

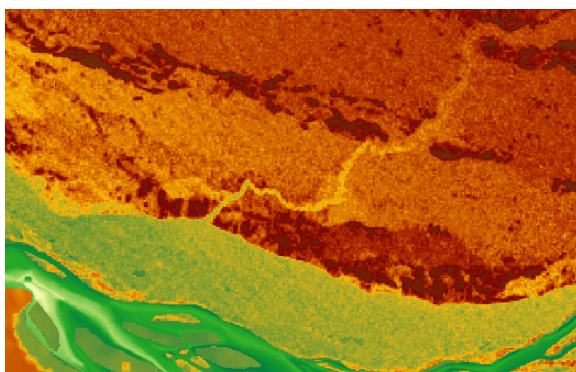
Tabla 2.3. Partición de caudales para los escenarios de aras inundadas a caudal constante.

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

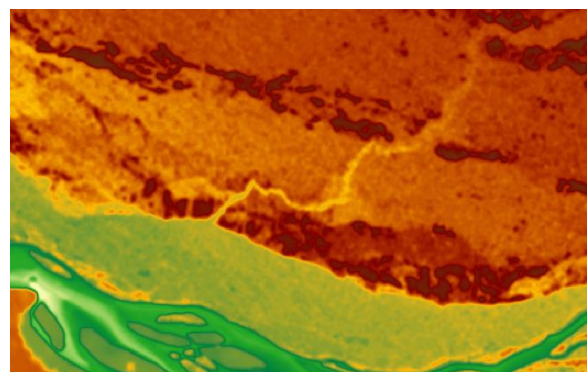
Se realizaron simulaciones para ambos valores de caudal, manteniéndolo constante hasta alcanzar condiciones de equilibrio, tanto para el río en condiciones naturales como para cada uno de las alternativas de cierre de Itatí-Itacorá, suponiendo condiciones de operación para niveles de retenida de 59 m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

Para la construcción de mapas de inundación se utilizó el algoritmo incorporado en el HEC-RAS a tal efecto. 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 contiene 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 pasa bajos 3x3 utilizando la herramienta *Filter* de ArcGIS. La comparación del MDE original y el filtrado se presenta en la **Figura 2.6**.



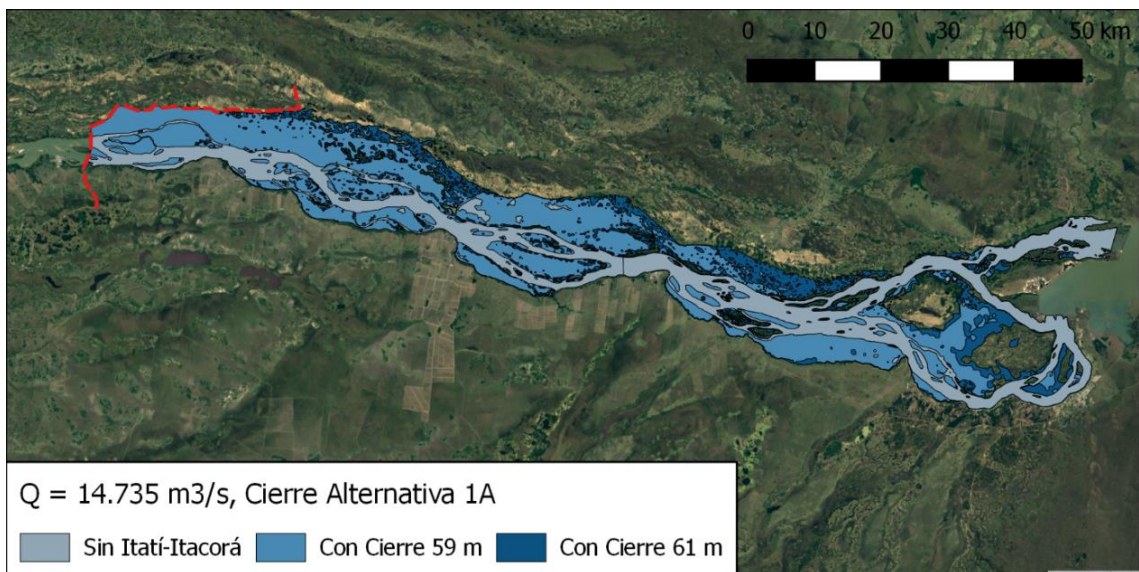
a) MDE Yacyretá



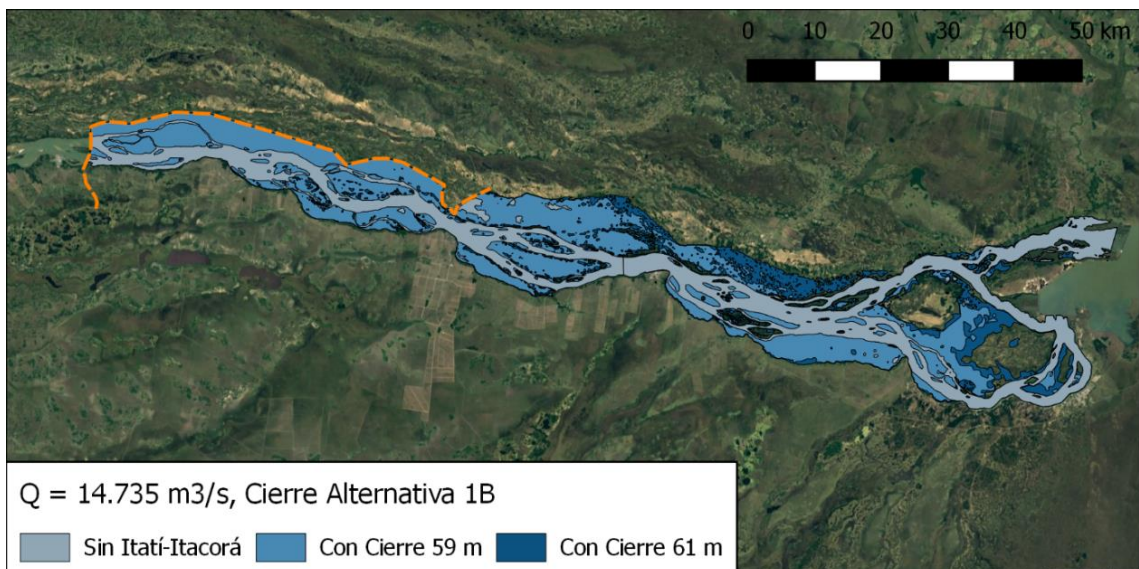
b) MDE filtrado

Figura 2.6. Modelo digital de elevación para mapas de inundación.

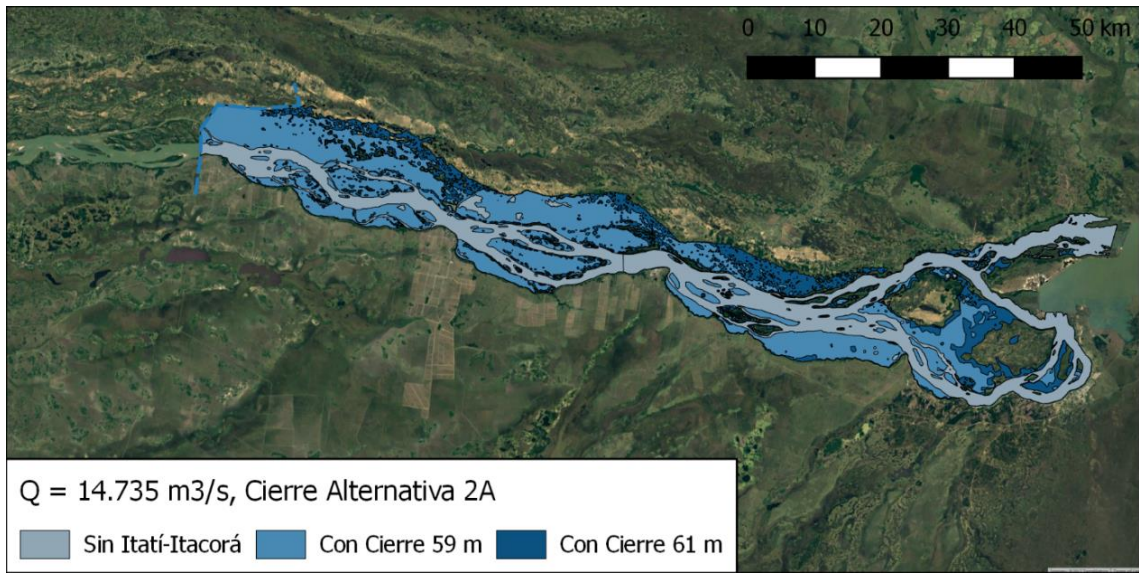
En la **Figura 2.7** se presentan los mapas de inundación para el caudal de $14.735 \text{ m}^3/\text{s}$, mientras que en la **Figura 2.8** se muestran los correspondientes a $45.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Se observa, como era de esperarse, que el aumento de áreas inundadas por efecto del cierre es 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 sucedería en condiciones naturales.



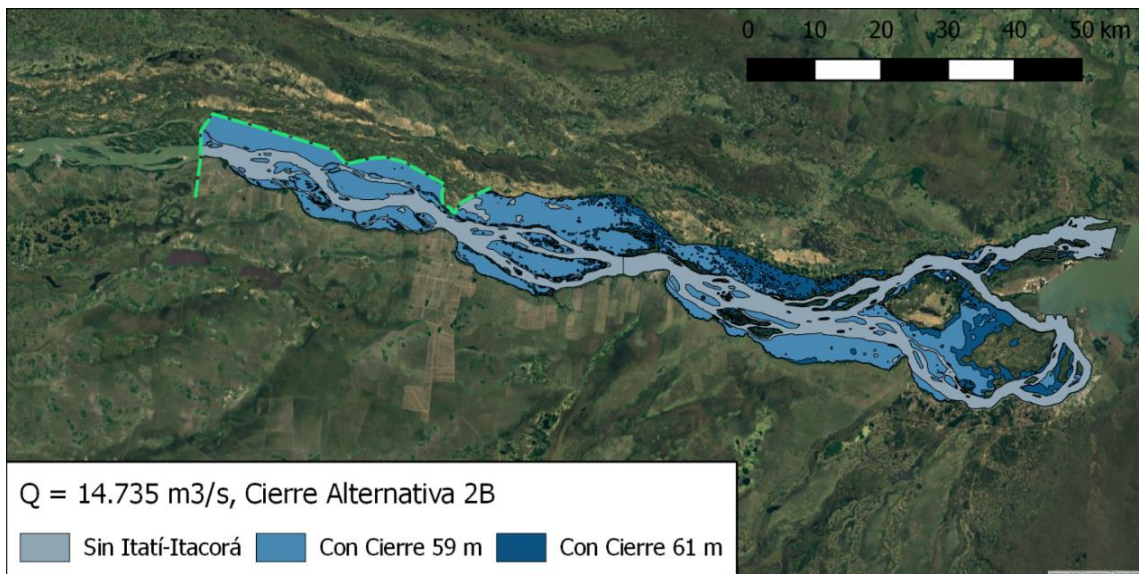
a) Alternativa 1A



b) Alternativa 1B

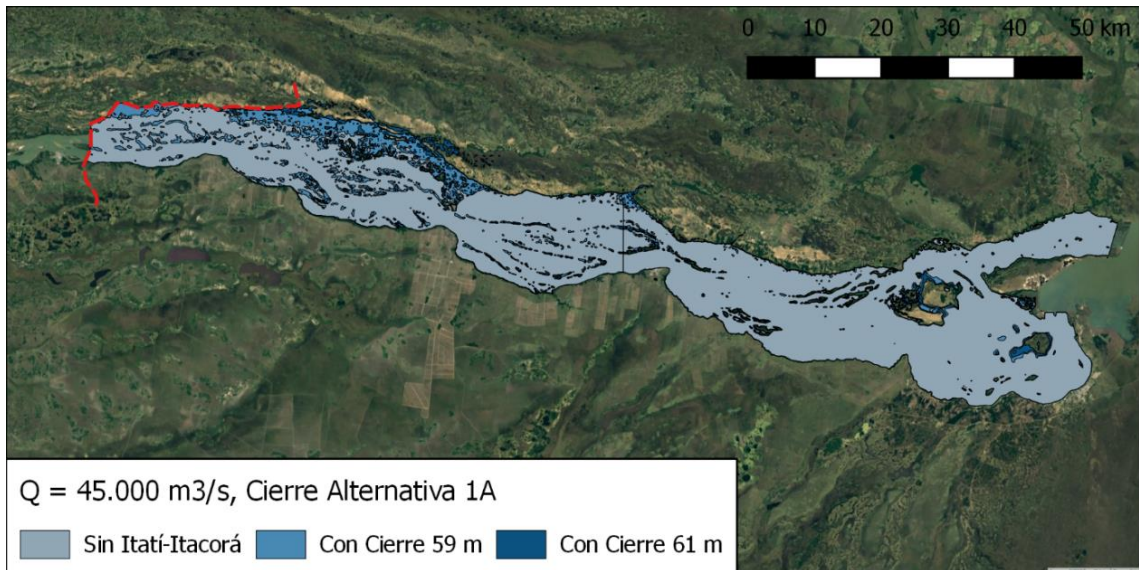


c) Alternativa 2A

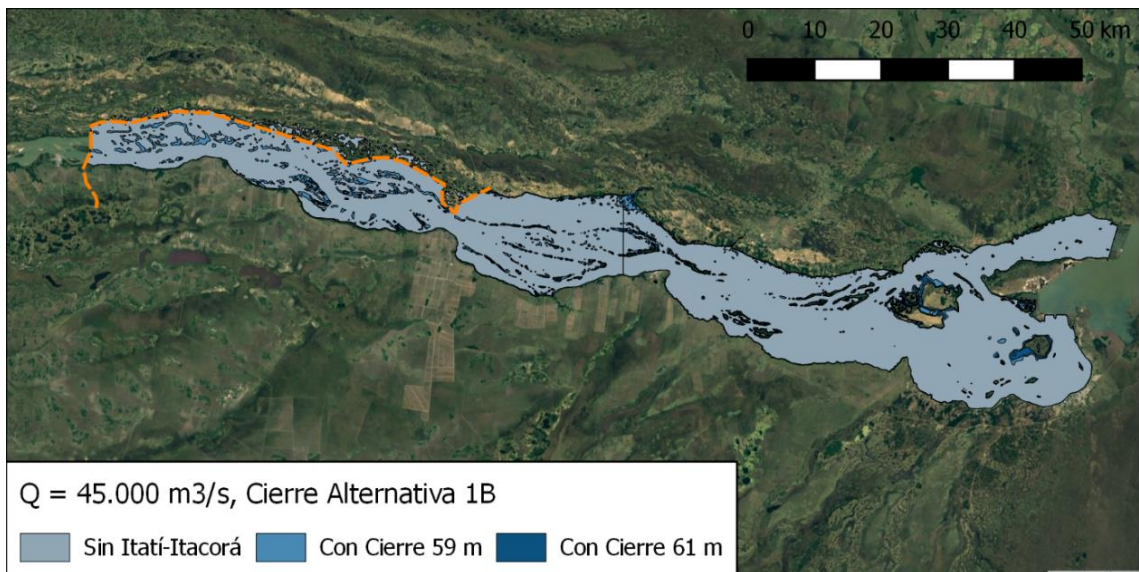


d) Alternativa 2B

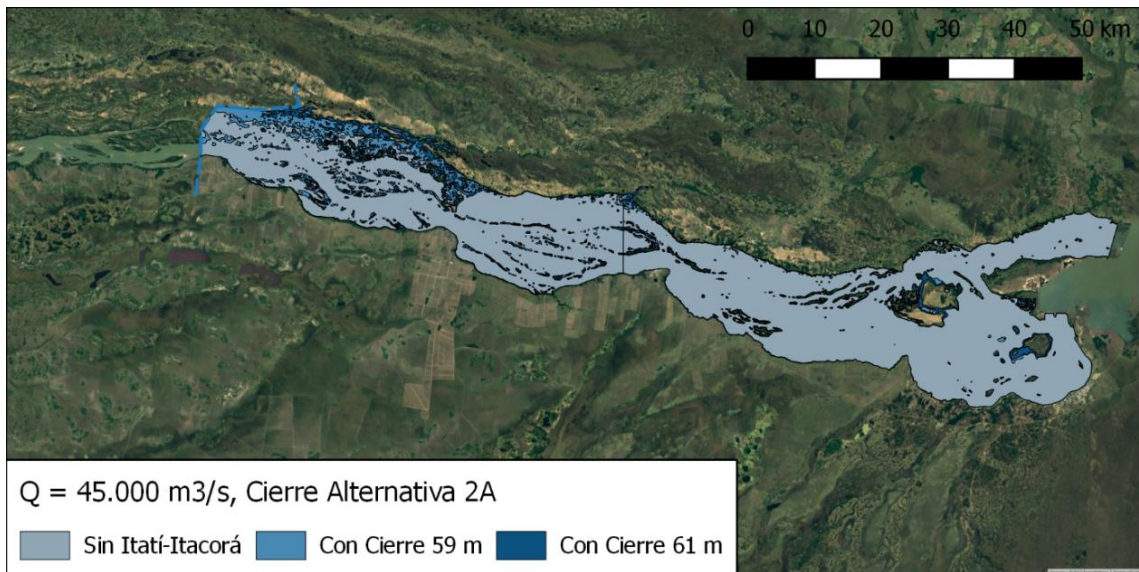
Figura 2.7. Áreas inundadas, caudal constante de 14.735 m³/s



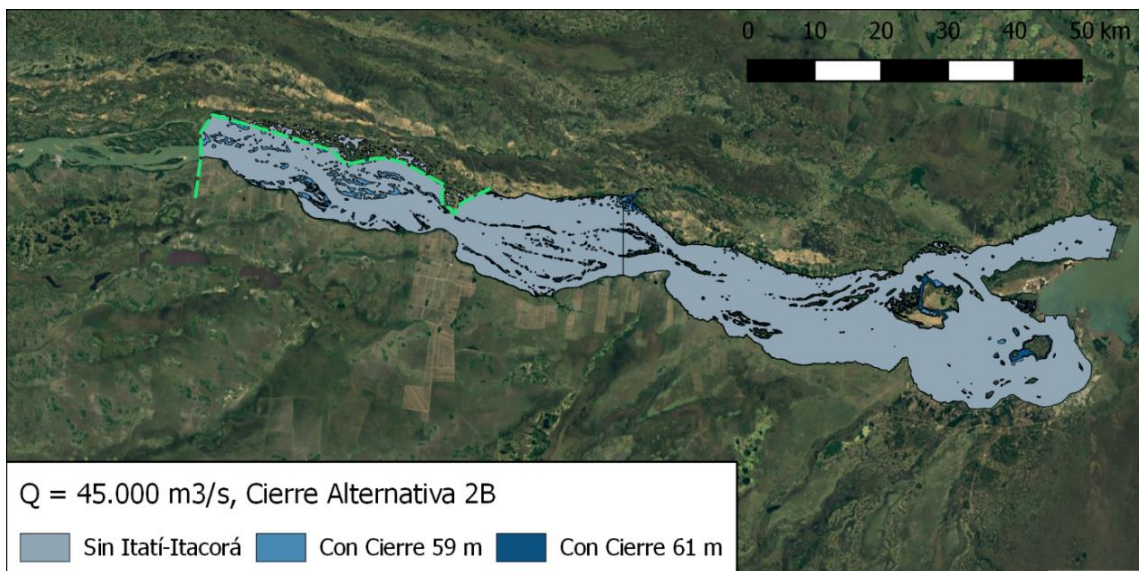
a) Alternativa 1A



b) Alternativa 1B



c) Alternativa 2A



d) Alternativa 2B

Figura 2.8. Áreas inundadas, caudal constante de 45.000 m³/s

Se cuantificaron las áreas inundadas para cada escenario, discriminándolas por zona según la **Figura 2.9**. Em la **Tabla 2.4** y la **Tabla 2.5** se presenta el detalle de área inundada para cada zona en el caso de embalse a cota 61 m, mientras que en la **Tabla 2.6** y la **Tabla 2.7** se presentan los resultados para el caso de embalse a cota 59 m.

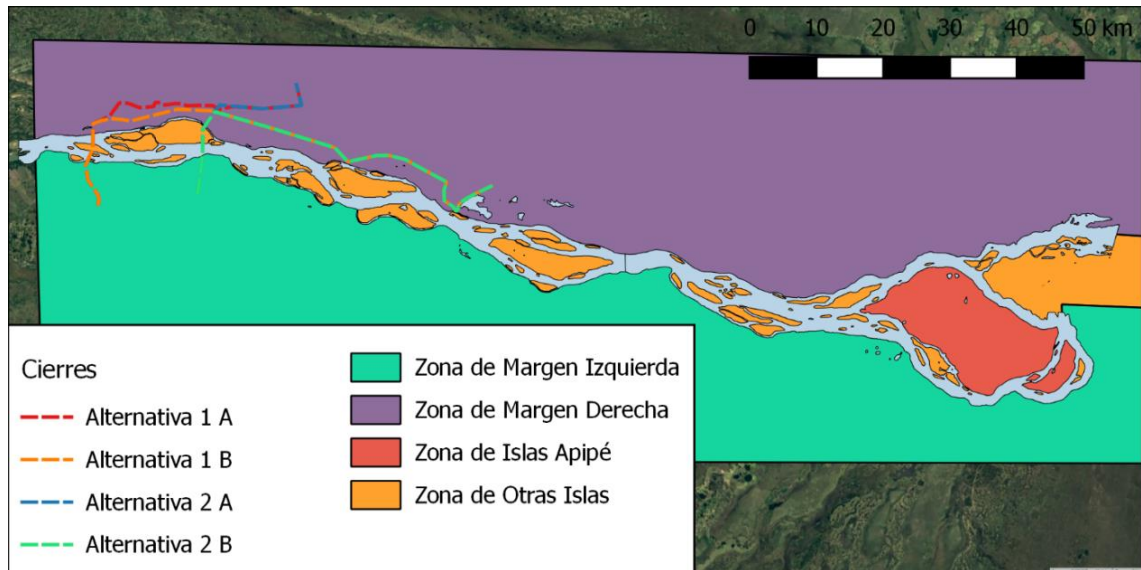


Figura 2.9. Zonas en las cuales se discrimina el área inundada.

Tabla 2.4. 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	has
(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(A-B)	
1a	176,770	63,211	56,278	15,515	26,839	14,926	113,558
1b	160,525	63,211	40,007	15,515	26,854	14,936	97,313
2a	162,403	58,603	51,531	15,479	21,979	14,811	103,800
2b	148,188	58,603	37,250	15,480	22,038	14,817	89,585

Tabla 2.5. 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	197,656	166,841	20,173	1,602	5,911	3,129	30,815	-
1b	179,883	166,841	2,344	1,610	5,927	3,160	13,042	17,773
2a	182,061	155,544	17,599	1,503	4,607	2,808	26,517	-
2b	167,006	155,544	2,464	1,511	4,652	2,835	11,462	15,055

Tabla 2.6. 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					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	147,341	63,211	39,938	14,077	22,738	7,376	84,130	
1b	137,496	63,211	29,853	14,078	22,971	7,382	74,285	
2a	132,659	58,603	35,072	13,993	17,903	7,088	74,056	
2b	125,151	58,603	26,949	13,996	18,510	7,093	66,548	

Tabla 2.7. Areas inundadas por zona, embalse nivel 59 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	188,643	166,841	14,709	1,068	4,560	1,465	21,802	-
1b	174,837	166,841	754	1,073	4,688	1,482	7,996	13,806
2a	171,940	155,544	11,401	907	2,987	1,101	16,396	-
2b	161,554	155,544	626	911	3,360	1,113	6,010	10,386

2.3.2 Perfiles Longitudinales

Se realizaron simulaciones con el modelo unidimensional 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 2.10** a la **Figura 2.18**. Se observan variaciones menores entre las distintas alternativas para un dado caudal y la misma cota de retenida.

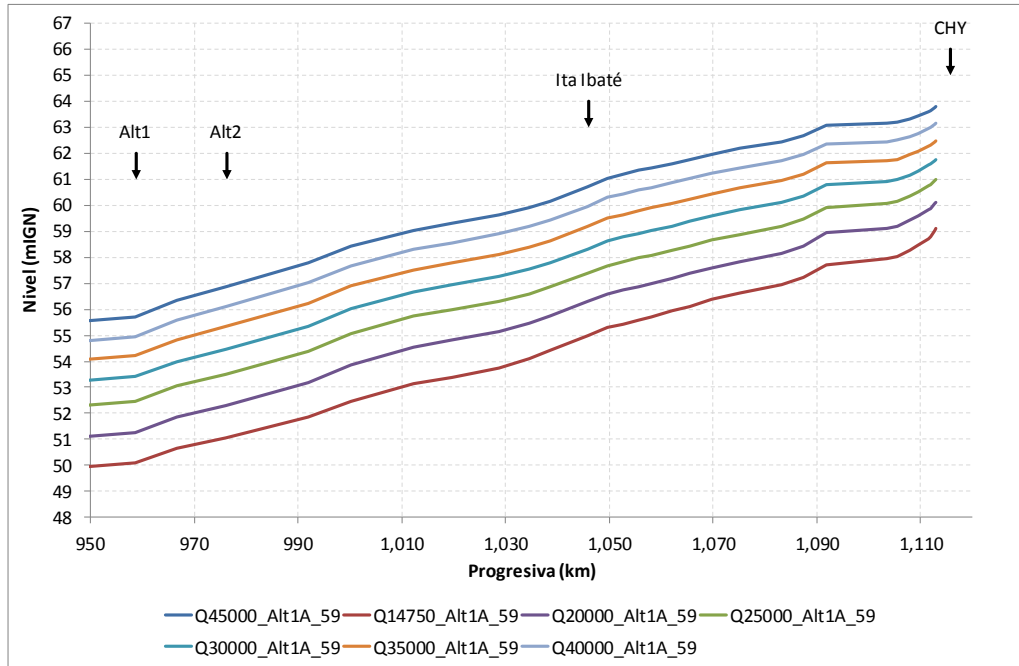


Figura 2.10. Perfil longitudinal con distintos caudales para escenario de condiciones naturales.

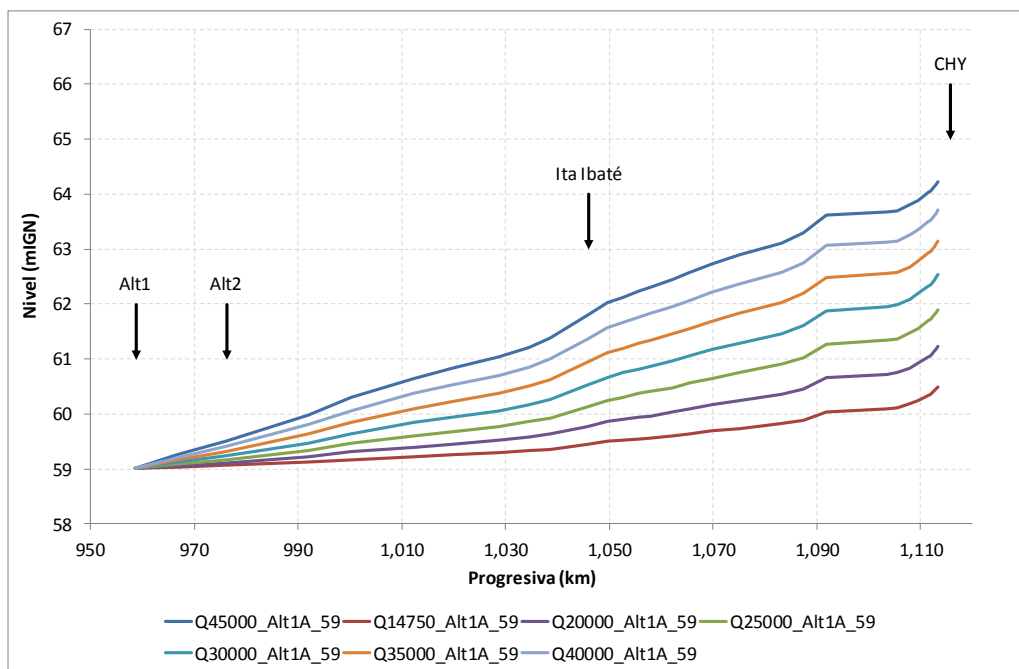


Figura 2.11. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 1A a cota 59 mIGN.

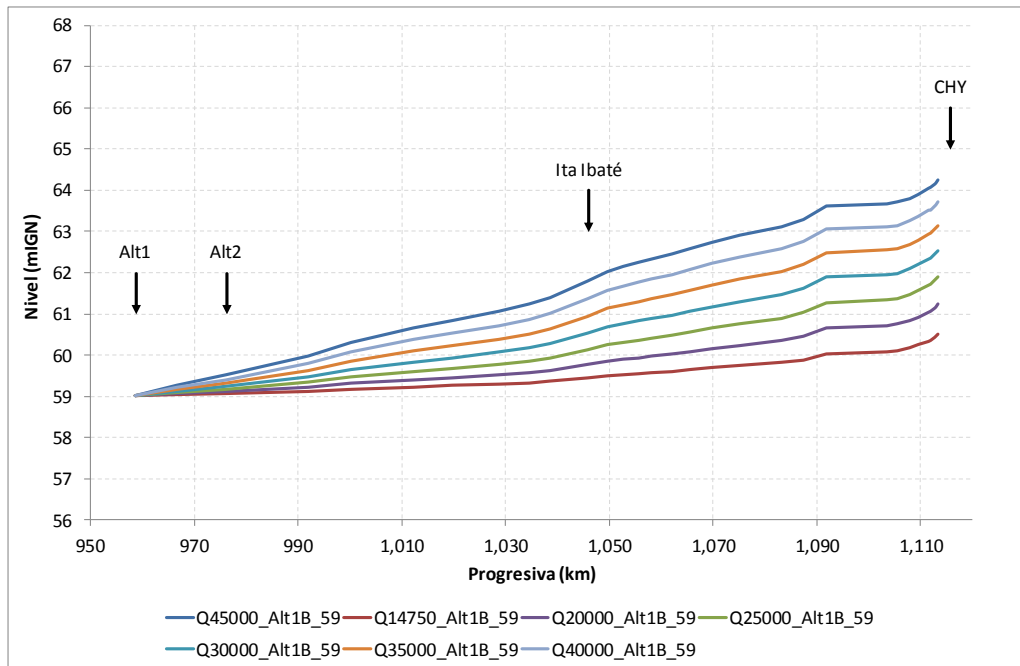


Figura 2.12. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 1B a cota 59 mIGN.

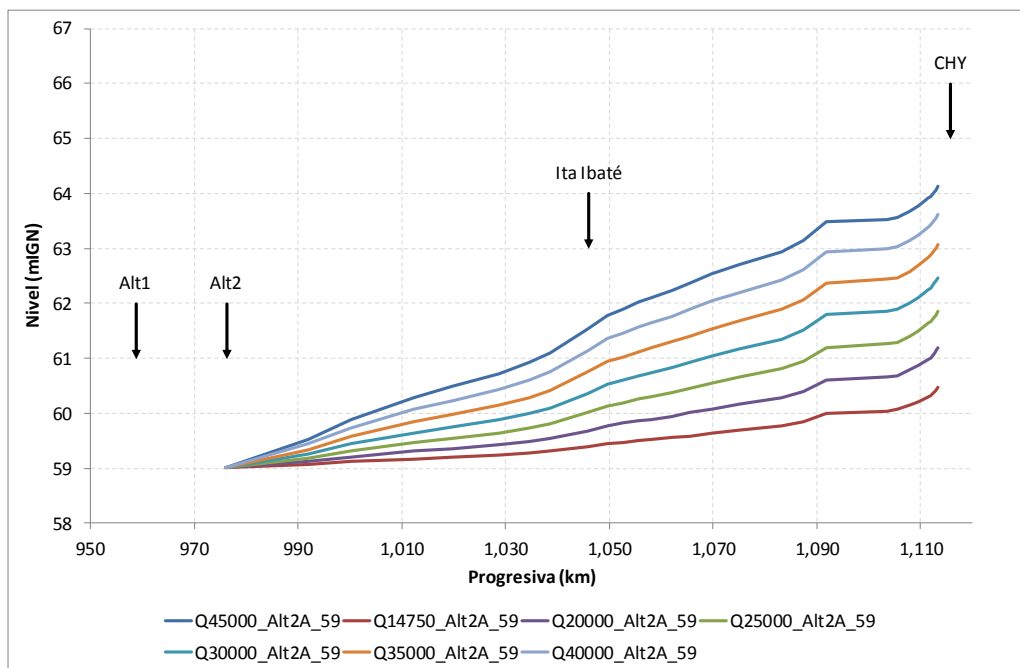


Figura 2.13. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 2A a cota 59 mIGN.

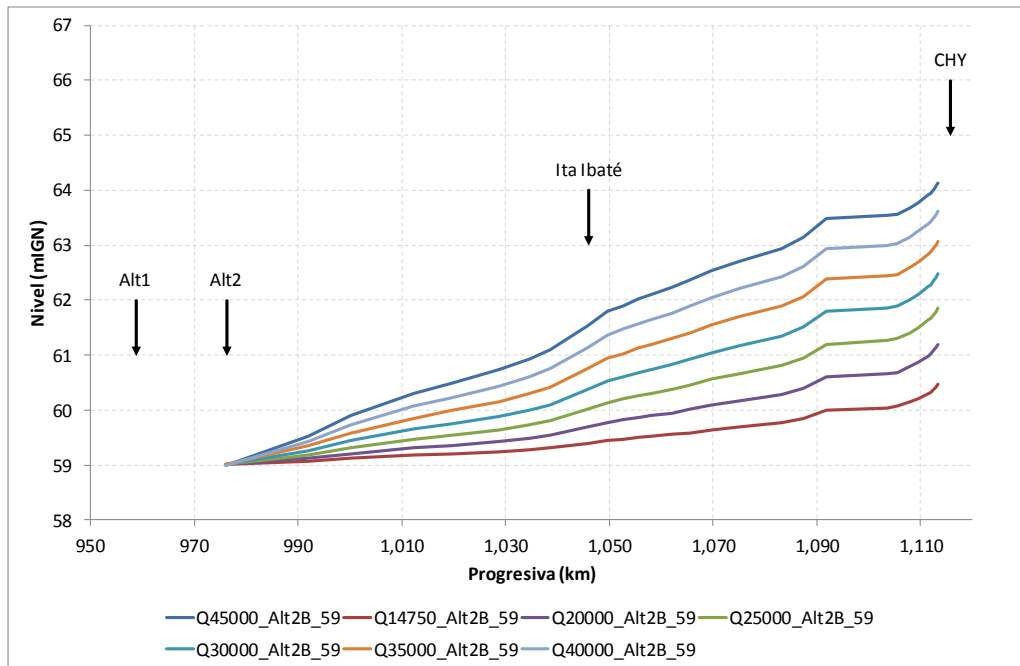


Figura 2.14. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 2B a cota 59 mIGN.

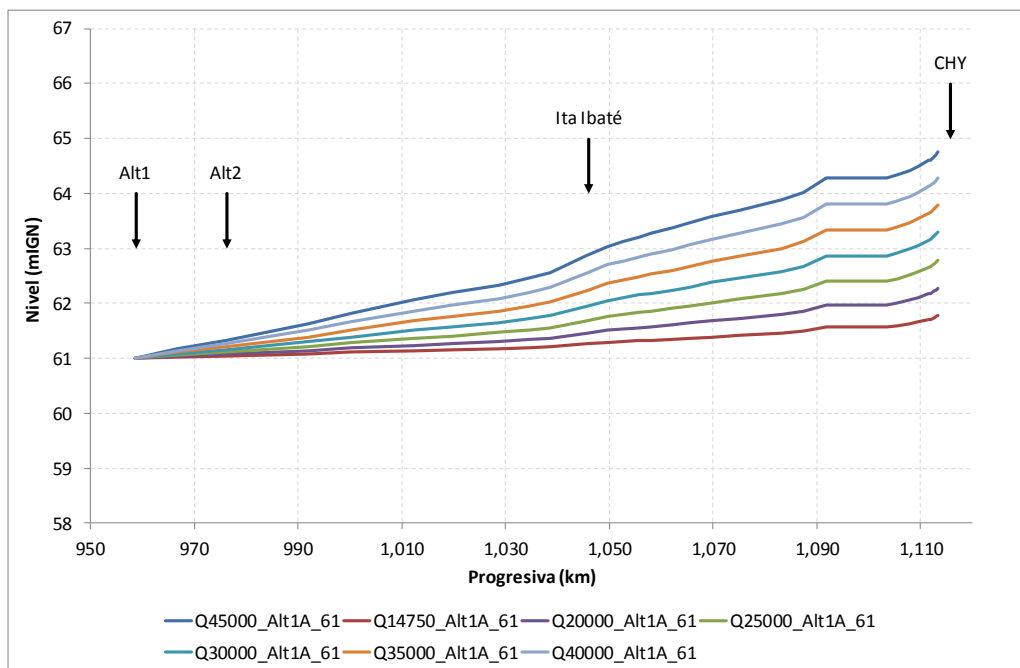


Figura 2.15. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 1A a cota 61 mIGN.

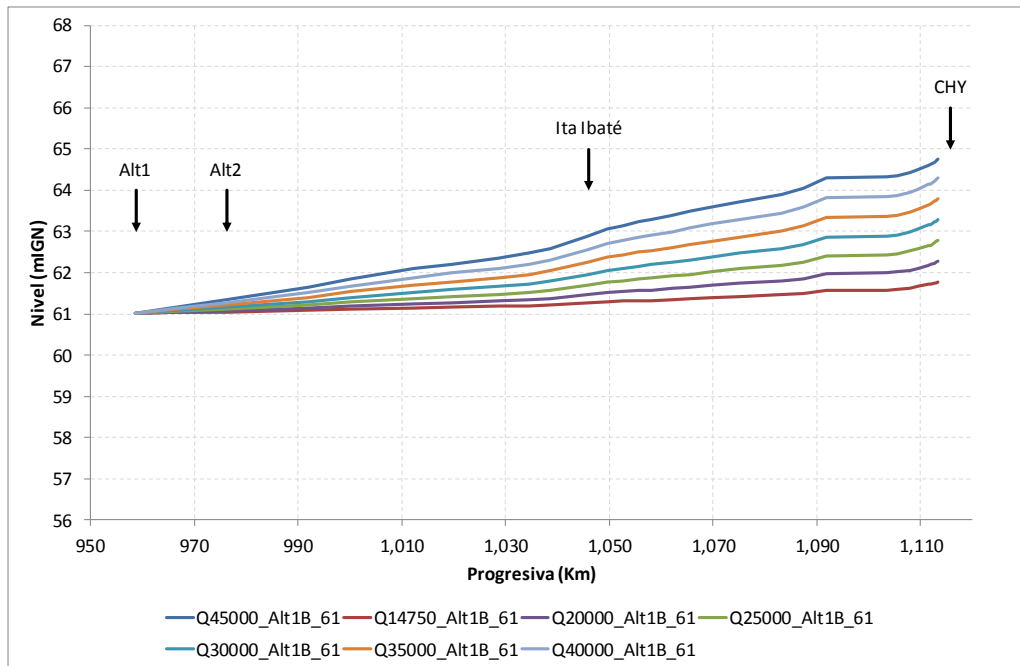


Figura 2.16. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 1B a cota 61 mIGN.

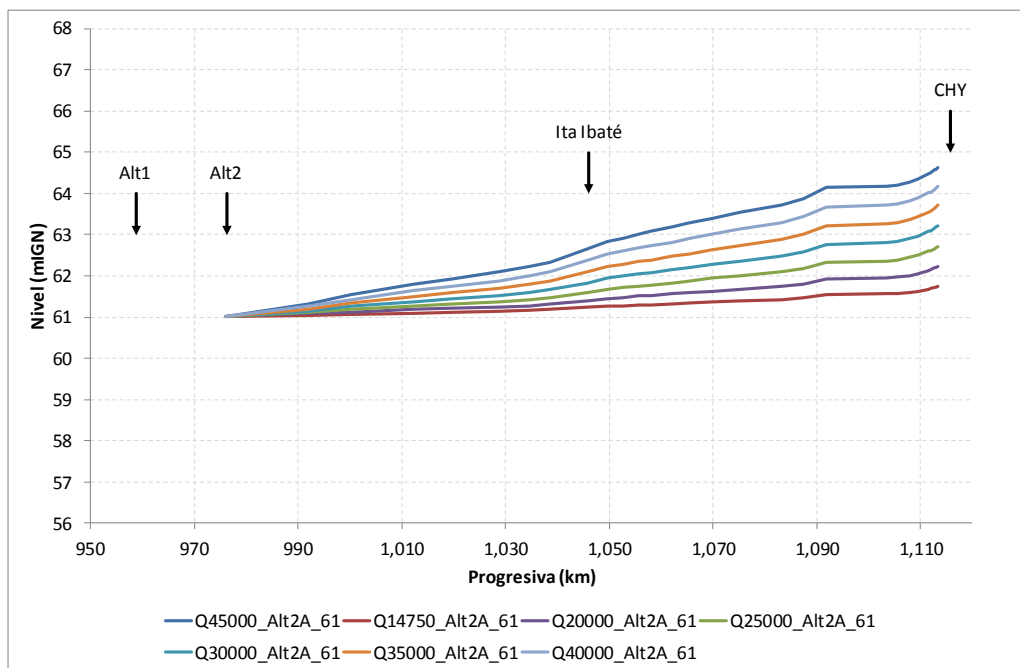


Figura 2.17. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 2A a cota 61 mIGN.

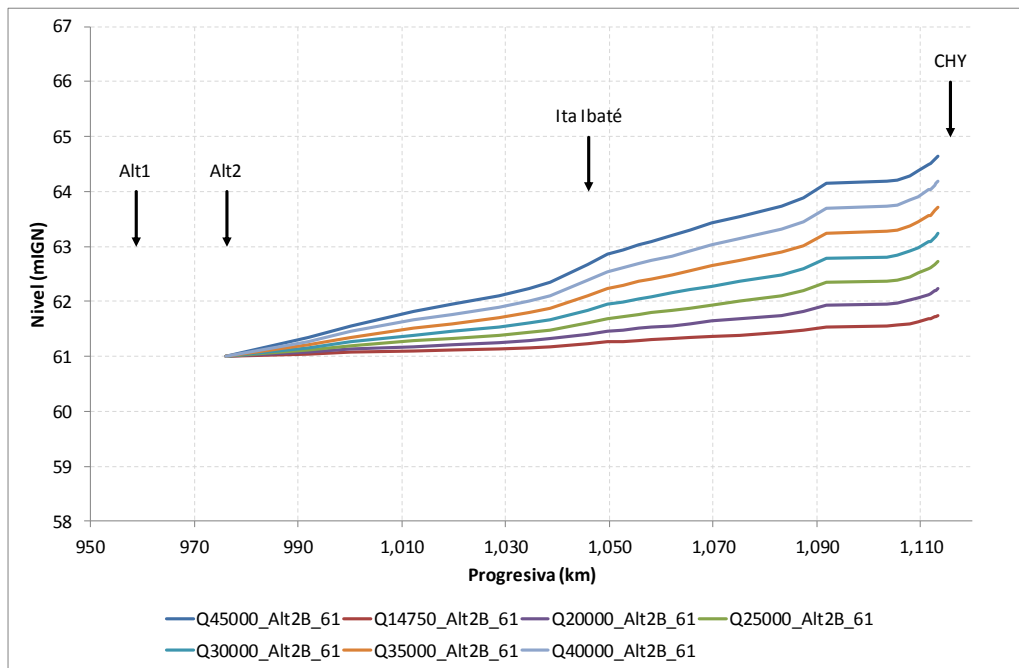


Figura 2.18. Perfil longitudinal con distintos caudales para la Alternativa 2B a cota 61 mIGN.

2.3.3 Efecto sobre la relación altura-caudal en la restitución de Yacyretá

El modelo unidimensional 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 de 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 2.19**). Dicho modelo fue construido utilizando el mismo MDE del terreno construido para extraer las secciones del modelo unidimensional (1D), representado en la **Figura 2.20**. 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.

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 2.21**). 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.

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.

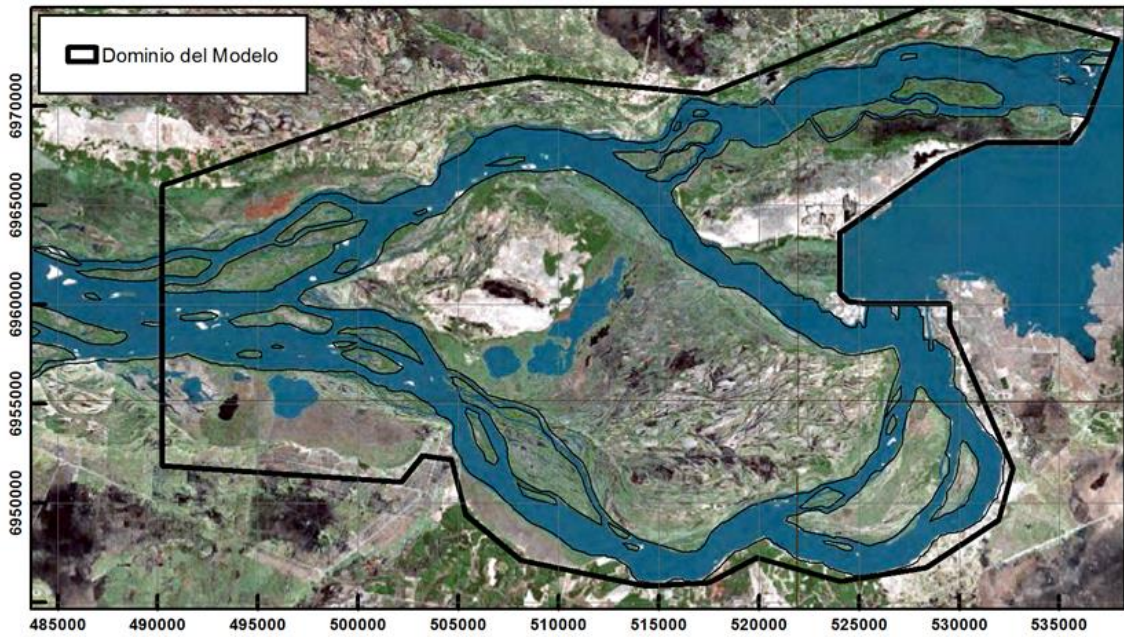


Figura 2.19. Dominio del modelo bidimensional.

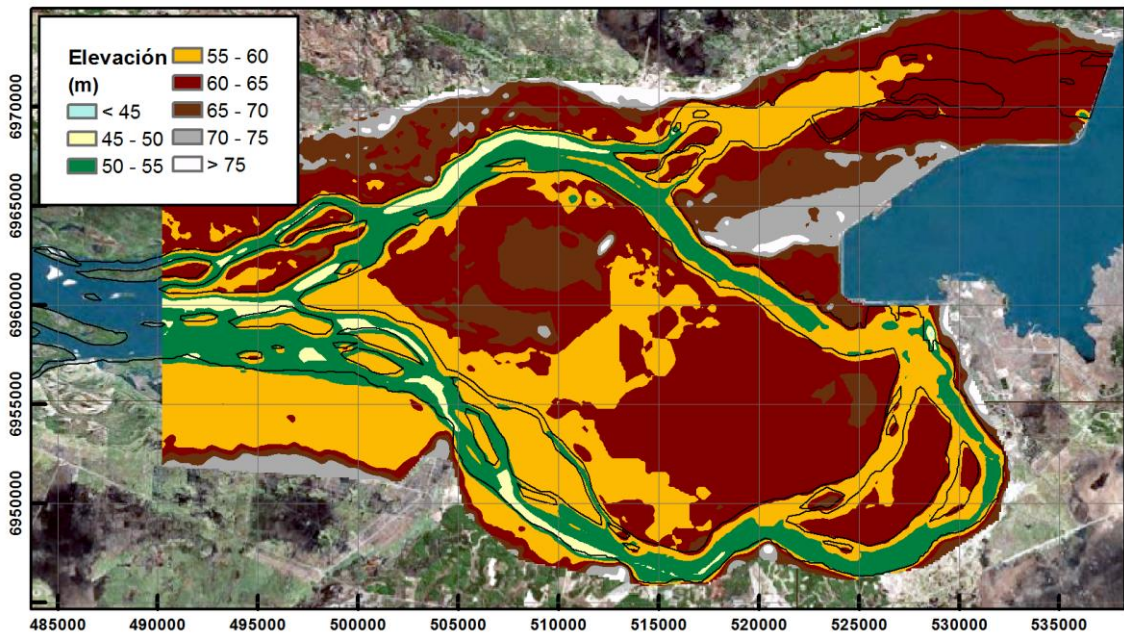


Figura 2.20. Modelo digital de elevación para el modelo bidimensional.

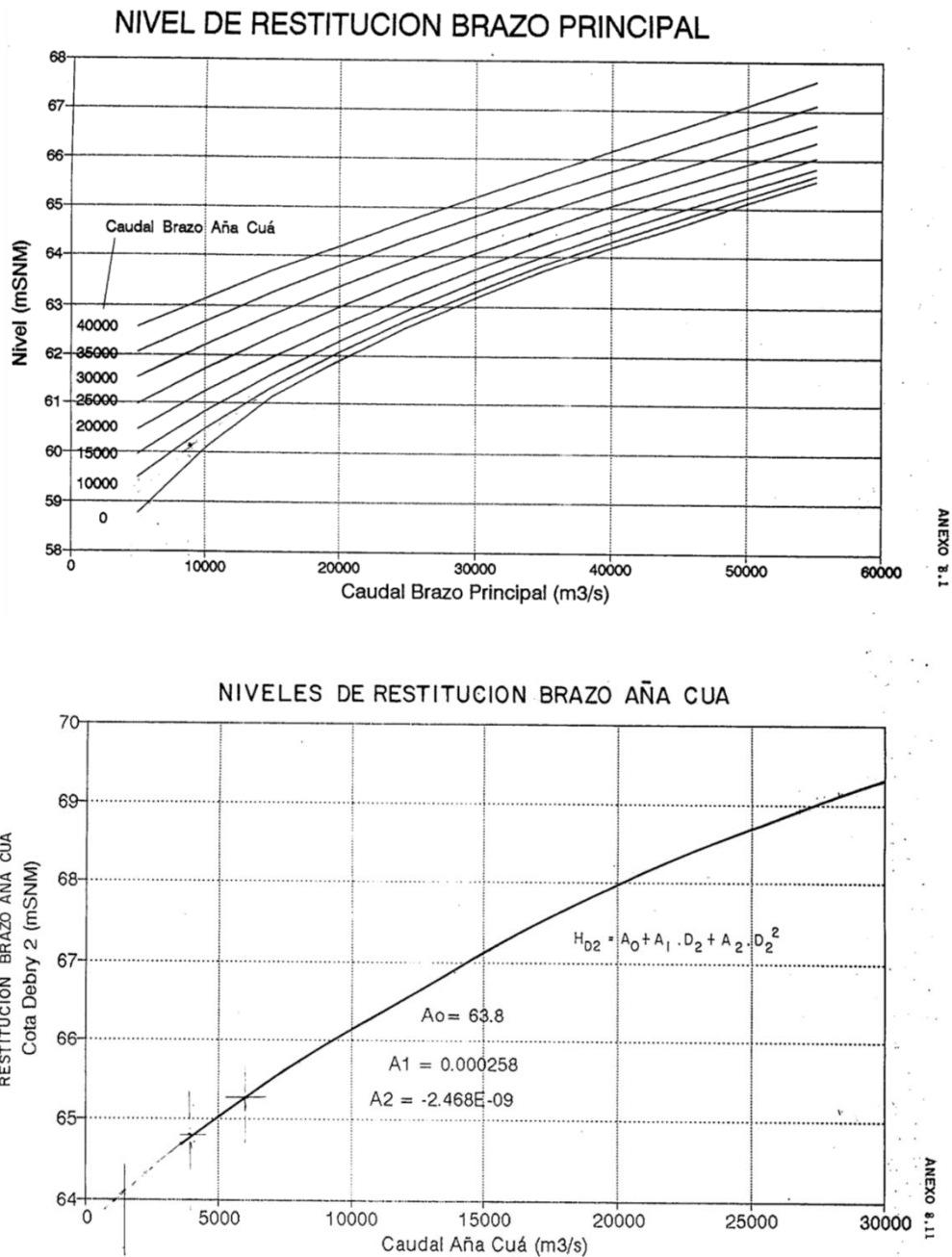


Figura 2.21. Curvas de restitución actuales de Yacyretá según su Manual de Operación y Mantenimiento.

En la **Figura 2.22** y la **Figura 2.23** se presentan 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.

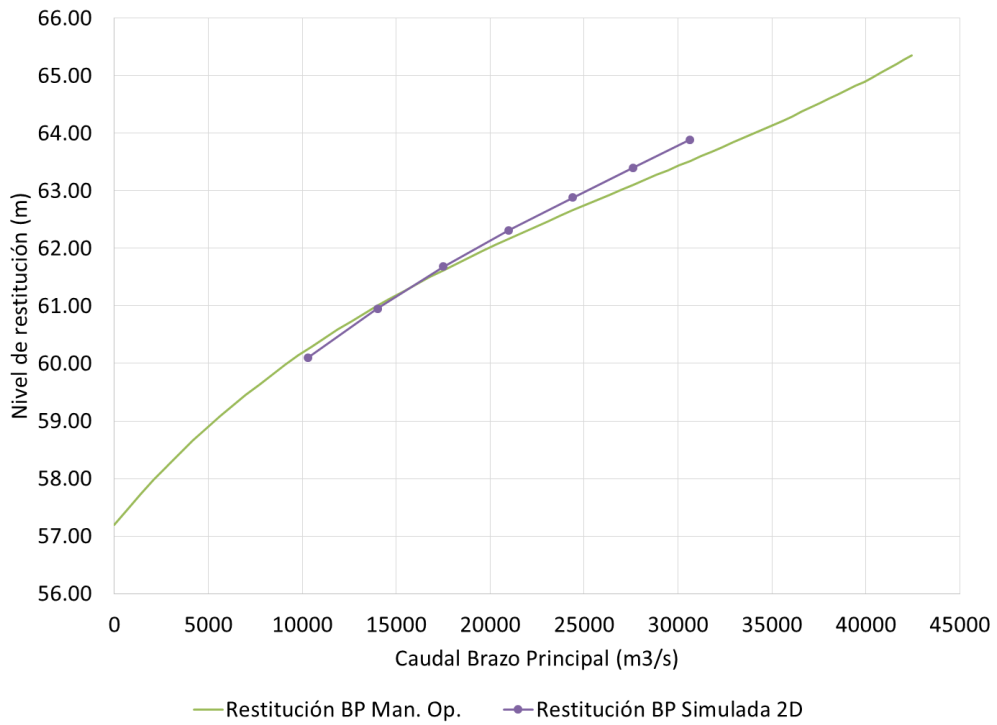


Figura 2.22. Comparación de la curva de restitución simulada para el Brazo Principal con la presentada en el Manual de Operación de Yacyretá

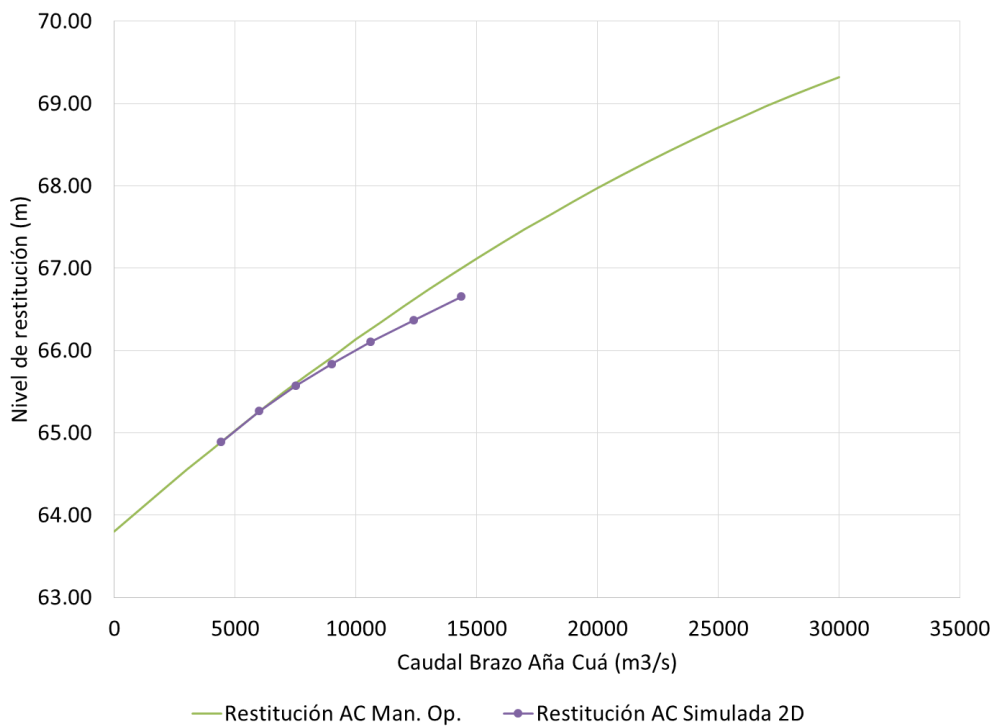


Figura 2.23. Comparación de la curva de restitución simulada para el Brazo Aña Cuá con la presentada en el Manual de Operación de Yacyretá

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 2.24** 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 máximo simulado estas sobreelevaciones se reducen a 0.40 m y 0.75 m, respectivamente.

En la **Figura 2.25** 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.

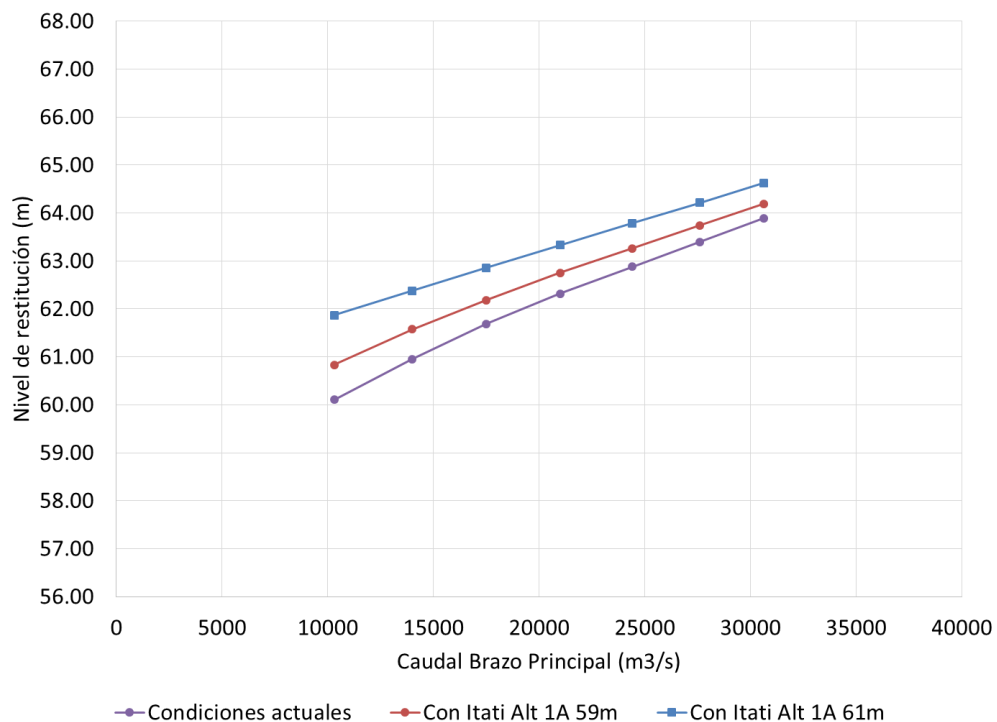


Figura 2.24. Efecto del cierre Itatí-Itacorá sobre la curva de restitución del Brazo Principal.

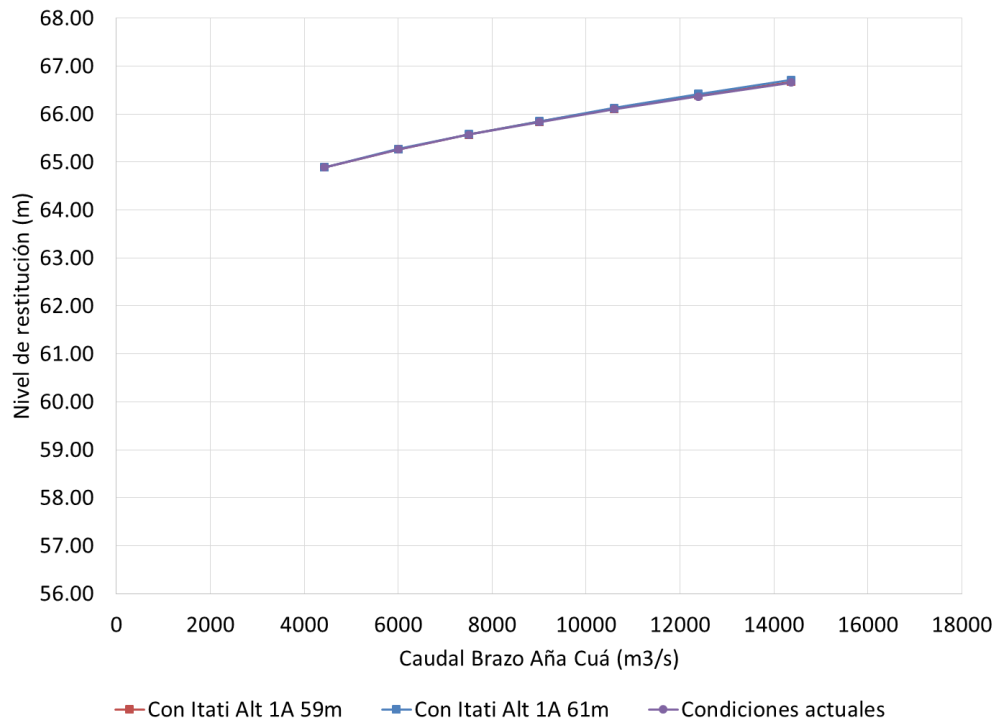


Figura 2.25. Efecto del cierre Itatí-Itacorá sobre la curva de restitución del Brazo Aña Cuá.

3 CURVA CLAVE EN ITATÍ-ITA CORÁ

3.1 Escala hidrométrica de Itatí

3.1.1 Ubicación

La estación hidrométrica Itatí se encuentra ubicada sobre la margen del río Paraná en la ciudad homónima (**Figura 3.1**), con coordenadas $27^{\circ}15'58,82688''\text{S}$, $58^{\circ}14'38,99209''\text{O}$. 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 3.1. Ubicación de estación hidrométrica Itatí.

3.1.2 Curvas altura-caudal

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 3.2**):

- 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 → $Q=183.78228 \cdot H^2 + 1705.04211 \cdot H + 4593.56857$

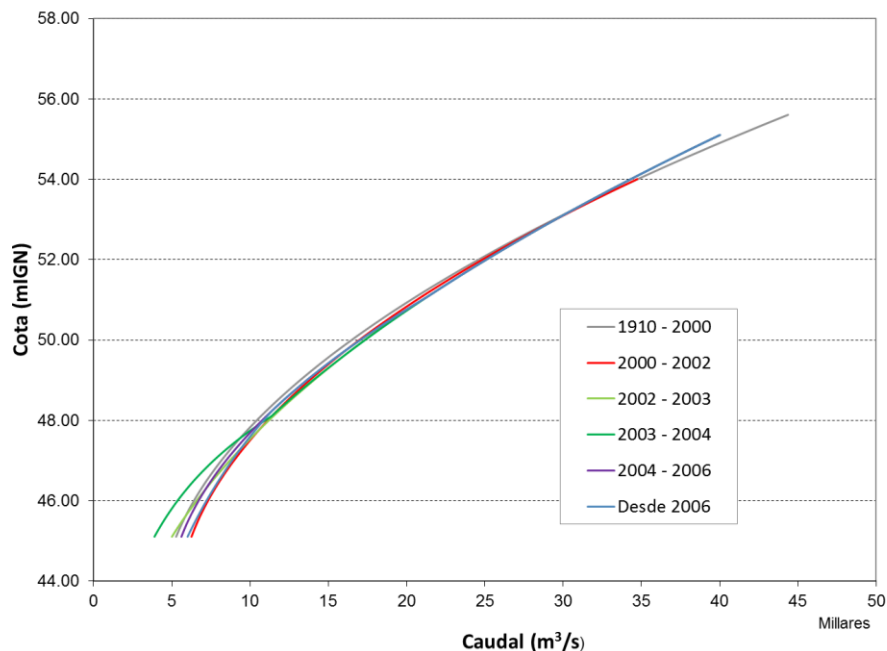


Figura 3.2. Curvas altura-caudal de la BDHI.

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

3.1.3 Cero de escala

Se colectaron distintos valores de la cota altimétrica del cero de esta escala, correspondientes a diferentes fuentes, según se indica en la **Tabla 3.1**. 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 3.3**. 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 3.1. 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

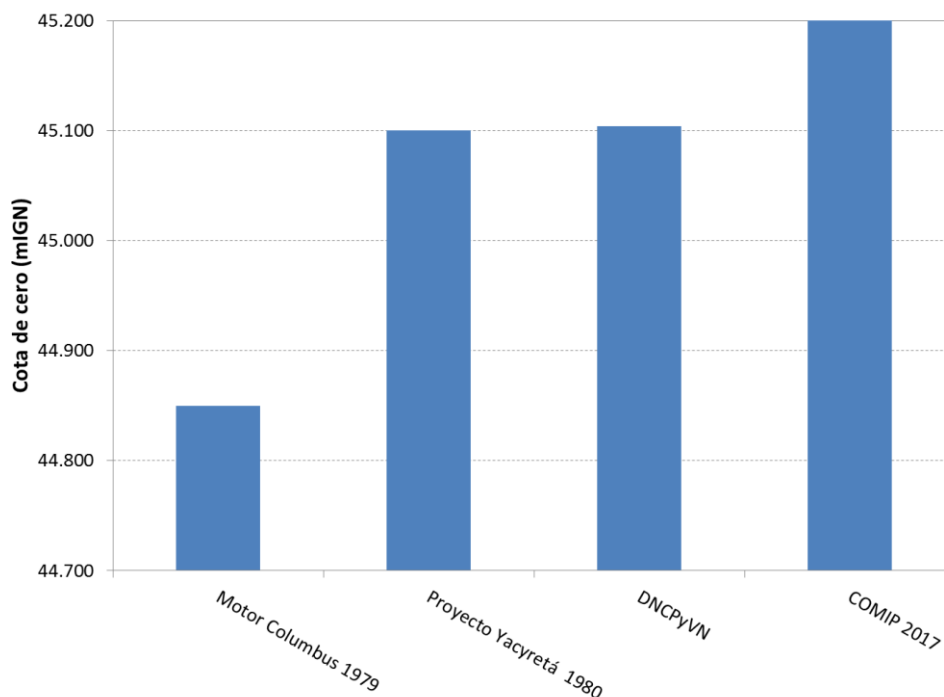


Figura 3.3. Cero de escala de Itatí de acuerdo a distintas fuentes.

3.2 Análisis

3.2.1 Aforos

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 3.4** 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 3.5**. Se observan muchos valores negativos, que indicarían caudales menores en Itatí que en Yacyretá, lo cual se considera una anomalía.

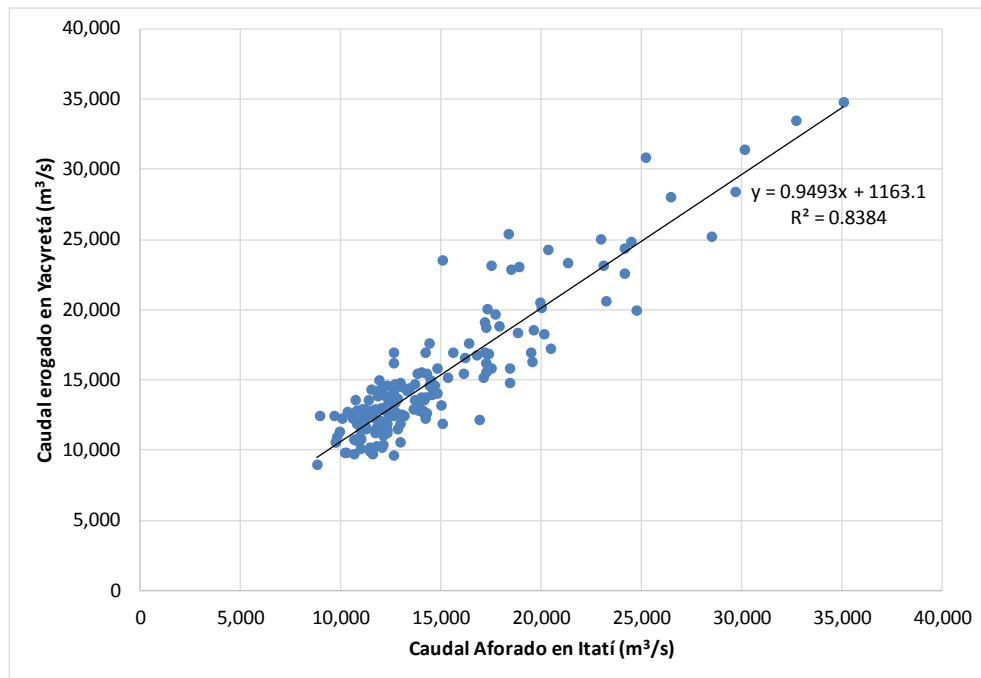


Figura 3.4. Caudales aforados en Itatí vs. caudales erogados por Yacyretá.

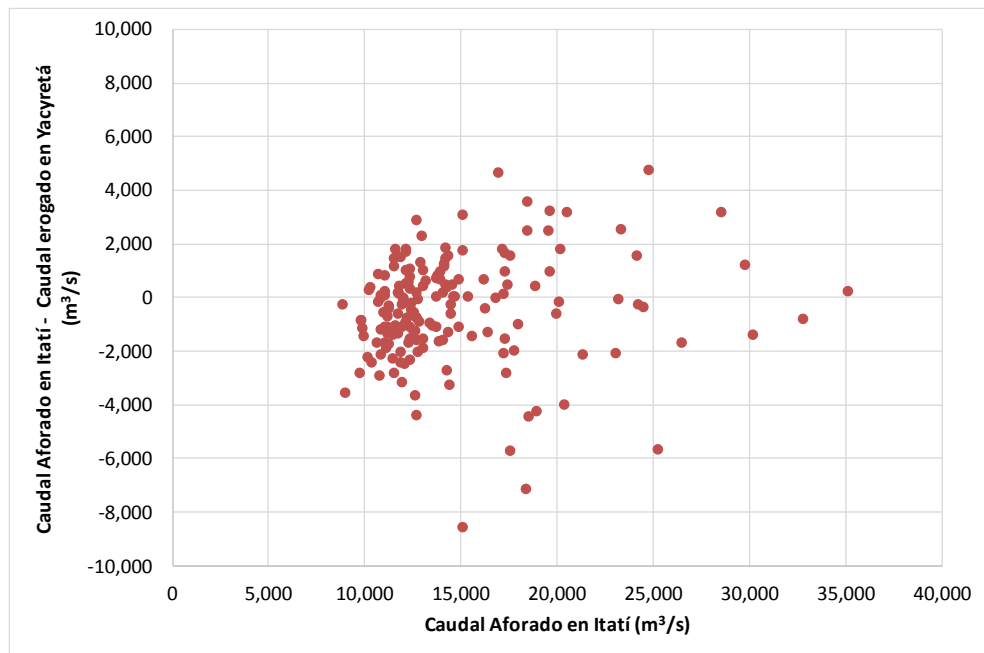


Figura 3.5. Diferencia entre caudales aforados en Itatí y caudales erogados por Yacyretá.

3.2.2 Modelo MOAGAB

Se utilizaron los resultados del modelo MOAGAB (ver capítulo anterior) para comparar sus predicciones con los caudales aforados en Itatí. Esto se muestra en la **Figura 3.6**, 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 3.7**. Se siguen observando valores negativos.

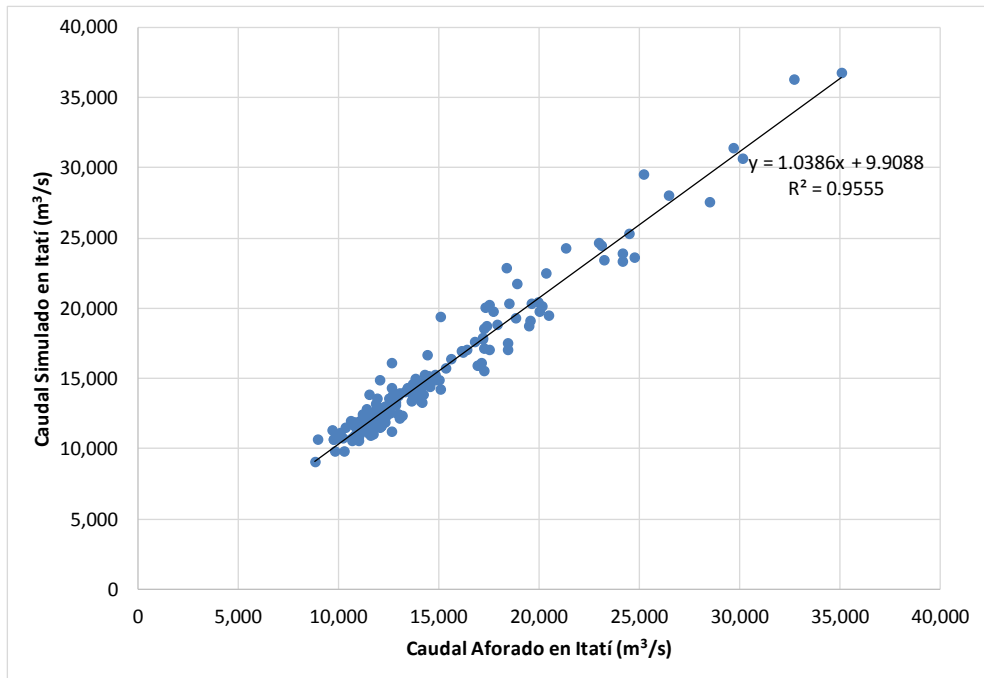


Figura 3.6. Caudales aforados en Itatí vs. caudales simulados con el modelo MOAGAB en Itatí.

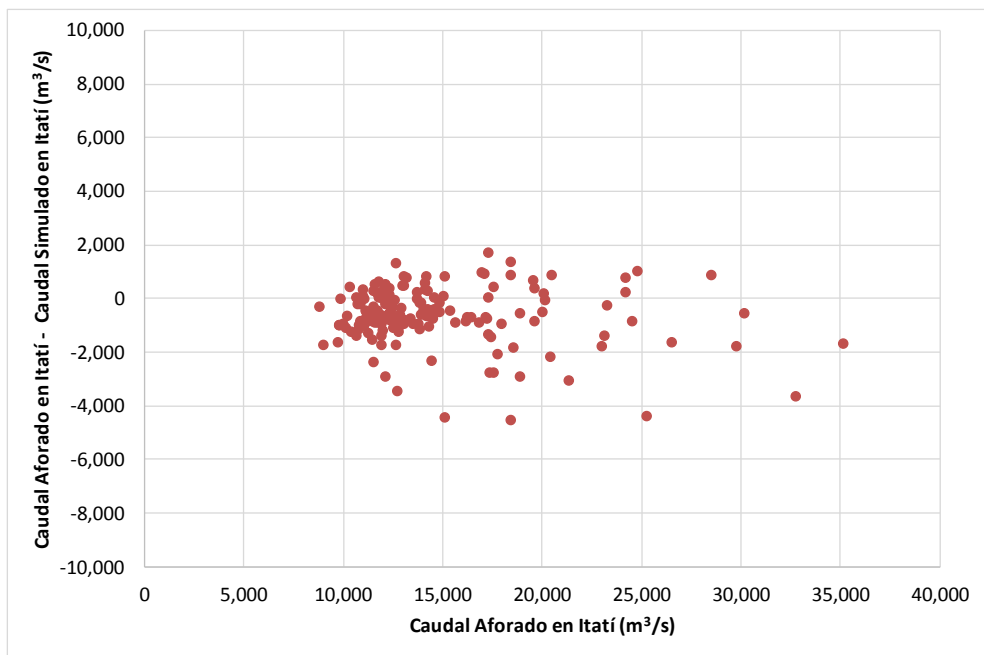


Figura 3.7. Diferencia de caudales aforados en Itatí y caudales simulados con el modelo MOAGAB en Itatí.

3.2.3 Curva altura-caudal del modelo MOAGAB

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 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 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 $15.000 \text{ m}^3/\text{s}$, salvo por unos pocos aforos por debajo de $8.000 \text{ m}^3/\text{s}$ que parecen adolecer de errores sistemáticos. Para caudales intermedios, hasta alrededor de $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$, 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 $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$, la tendencia de desplazamiento es bien definida.

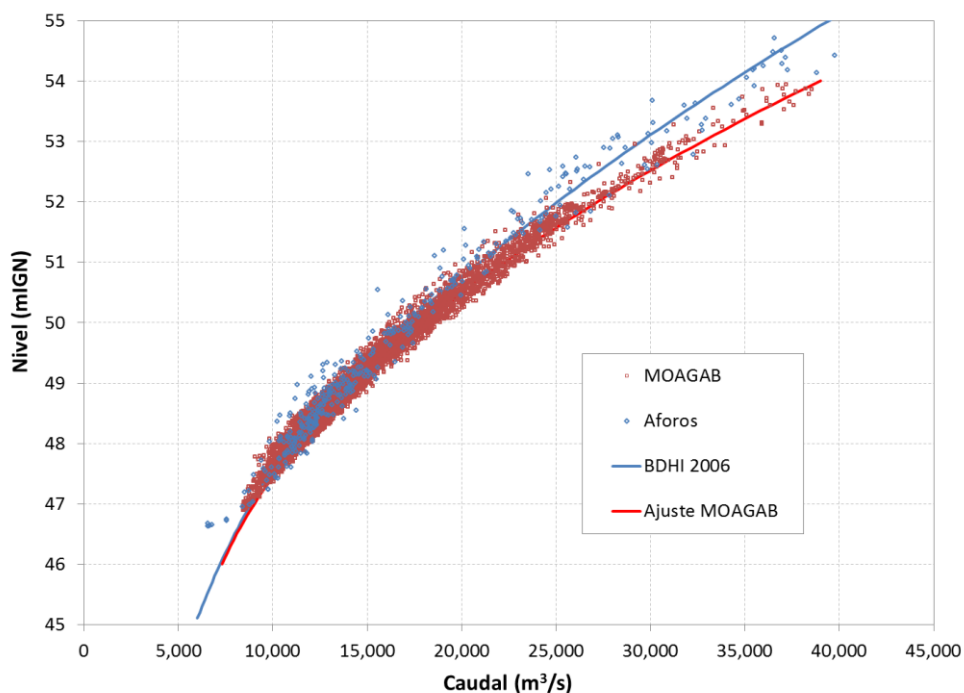


Figura 3.8. Relación altura-caudal de acuerdo al modelo MOAGAB, y aforos en Itatí.

3.2.4 Volumen acumulado

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 3.9**). 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.

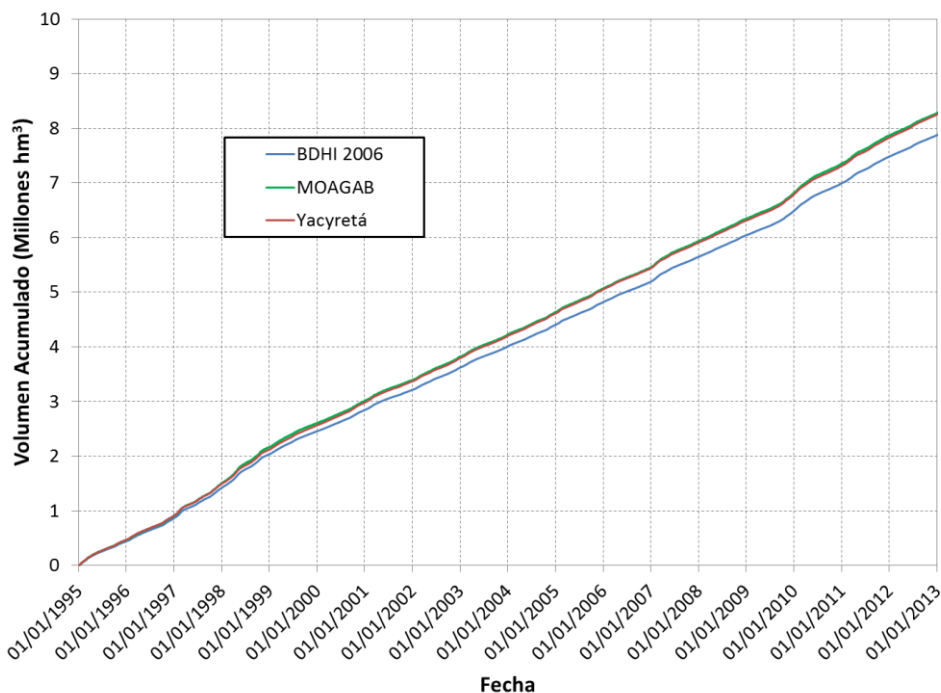


Figura 3.9. Curvas de volúmenes acumulados erogados por Yacyretá y calculados con las curvas altura-caudal de BDHI y de MOAGAB.

3.2.5 Conclusiones

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.

4 ACCIÓN DEL OLAJE

4.1 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.

4.2 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 descrito 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.

4.3 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 4.1). Se cuenta con un total de 200 x 758 nodos, abarcando un área de 1891.9 km².

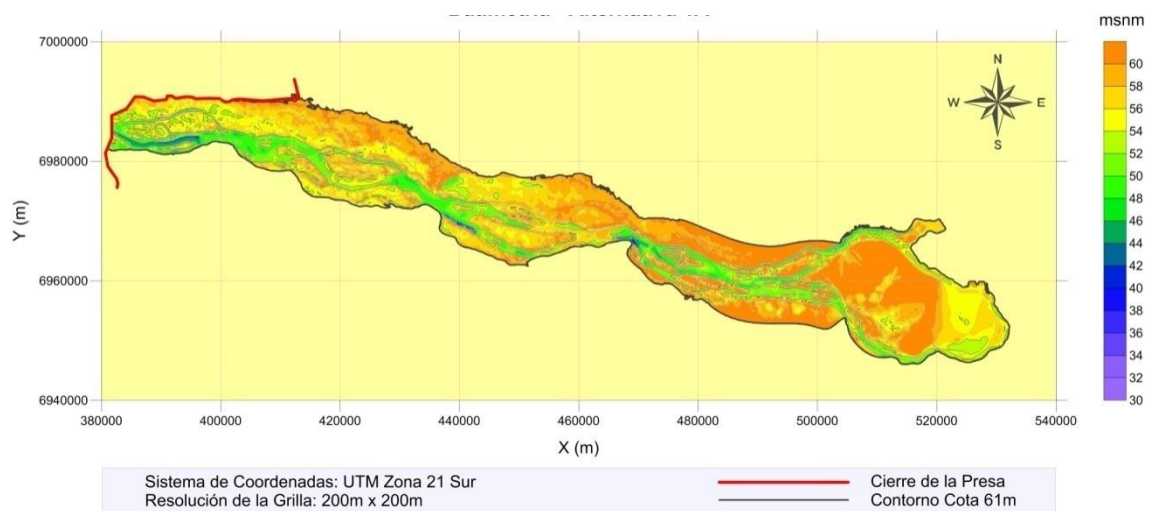


Figura 4.1. Dominio de cálculo para la evaluación del oleaje en el embalse

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.

Para este análisis se consideró la configuración de cierre denominada A1, señalada en la Figura 4.1, contemplando los límites del espejo de agua 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.

4.4 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 4.1, 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).[‡]

Tabla 4.1. 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 4.1, 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.

4.5 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 4.2, la Figura 4.3 y la Figura 4.4 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.

[‡] Informe INA. Medición y pronóstico de olas en el Embalse de Yacretá. Informe de avance N°1, LHA-213-09-15.

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).

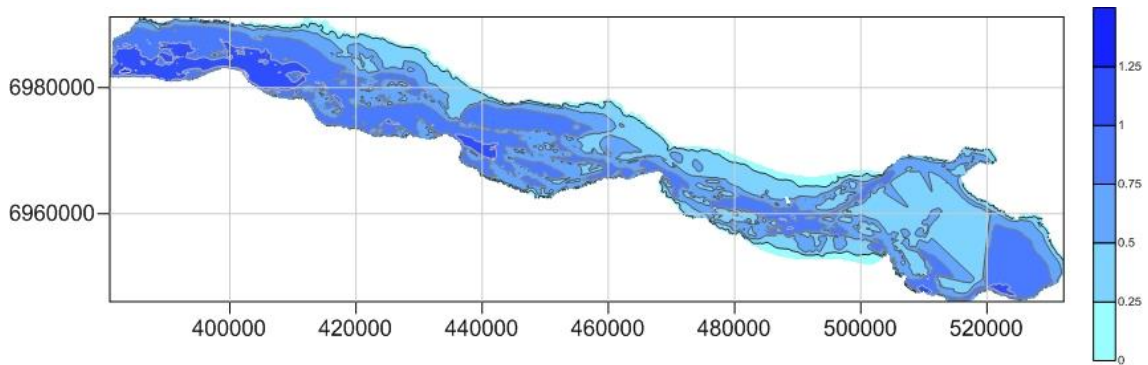


Figura 4.2. Resultado de la modelación. Viento NE, $W=16.7$ m/s (60 km/h)

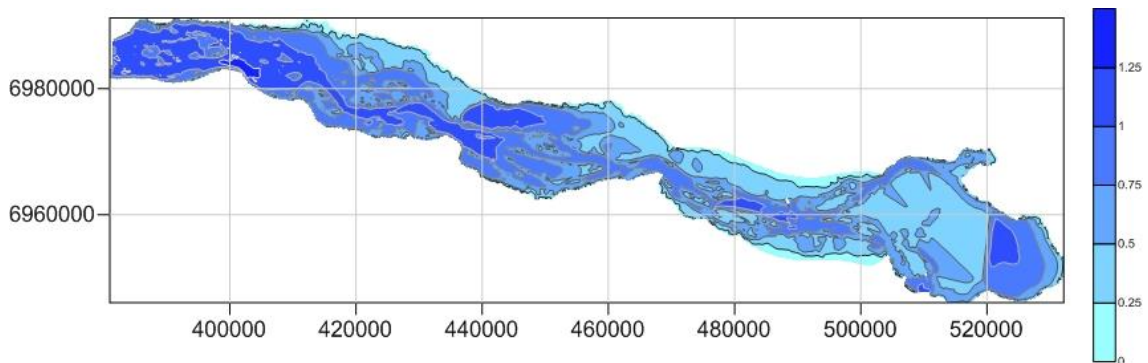


Figura 4.3. Resultado de la modelación. Viento E, $W=16.7$ m/s (60 km/h)

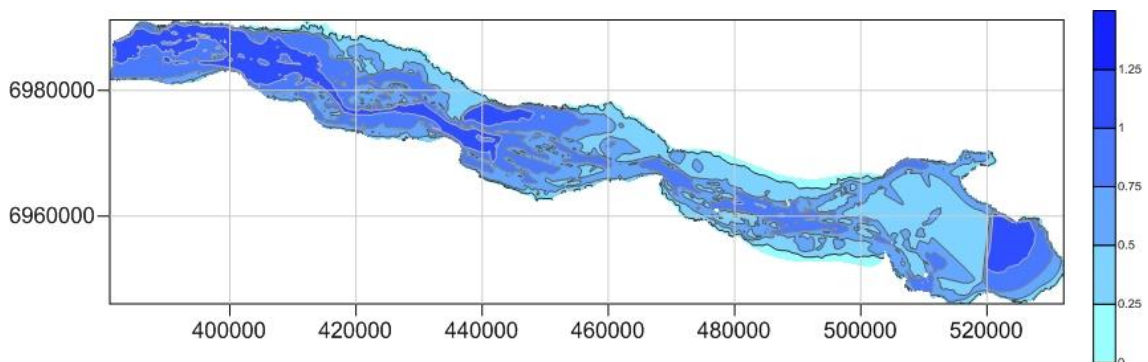


Figura 4.4. Resultado de la modelación. Viento SE, $W=16.7$ m/s (60 km/h)

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.

Se identificaron tres tramos costeros de análisis (Figura 4.5): Cierre (40 km), Margen derecha (150 km) y Margen izquierda (165 km). En la Tabla 4.2, la Tabla 4.3 y la Tabla 4.4 se presentan los resultados de la totalidad de escenarios simulados para cada uno de los tres tramos, indicándose el valor máximo de H_s .

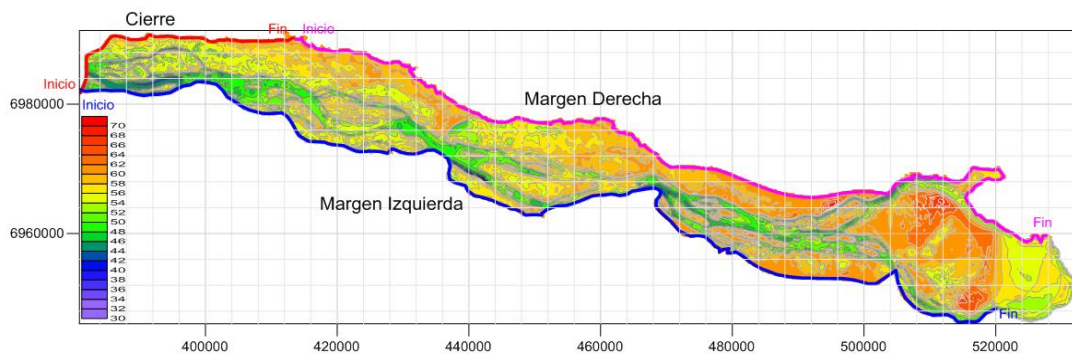


Figura 4.5. Identificación de tramos de interés para la evaluación de los resultados

Tabla 4.2. Resultado de la modelación del oleaje sobre el cierre del embalse

TR (años)	Altura de ola significativa H_s (m)															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.37	0.46	0.59	0.65	0.69	0.45	0.61	0.53	0.71	0.75	0.88	0.66	0.65	0.42	0.37	0.31
5	0.43	0.55	0.70	0.81	0.85	0.53	0.73	0.67	0.88	0.86	1.02	0.80	0.82	0.52	0.45	0.37
10	0.47	0.60	0.78	0.91	0.95	0.57	0.79	0.77	0.98	0.93	1.09	0.90	0.92	0.58	0.49	0.41
20	0.50	0.66	0.84	1.01	1.05	0.62	0.86	0.85	1.07	0.99	1.12	0.99	1.02	0.63	0.54	0.46
50	0.55	0.73	0.94	1.13	1.18	0.68	0.94	0.95	1.17	1.07	1.14	1.09	1.14	0.71	0.60	0.52
100	0.60	0.78	1.01	1.22	1.26	0.72	1.00	1.02	1.25	1.13	1.15	1.18	1.23	0.76	0.65	0.56

Tabla 4.3. Resultado de la modelación del oleaje sobre la margen derecha del embalse

TR (años)	Altura de ola significativa H_s (m)															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.35	0.32	0.41	0.47	0.53	0.40	0.56	0.56	0.85	0.86	0.89	0.61	0.60	0.39	0.38	0.38
5	0.41	0.38	0.49	0.57	0.64	0.45	0.67	0.72	1.09	1.00	1.04	0.75	0.77	0.48	0.46	0.46
10	0.44	0.42	0.54	0.64	0.72	0.49	0.73	0.82	1.22	1.09	1.11	0.84	0.88	0.54	0.50	0.51
20	0.47	0.46	0.60	0.70	0.79	0.53	0.80	0.91	1.39	1.17	1.15	0.93	0.98	0.59	0.55	0.56
50	0.51	0.51	0.66	0.78	0.88	0.58	0.89	1.04	1.56	1.28	1.19	1.04	1.10	0.67	0.61	0.62
100	0.54	0.56	0.72	0.85	0.95	0.61	0.95	1.13	1.65	1.35	1.21	1.11	1.20	0.72	0.64	0.66

Tabla 4.4. Resultado de la modelación del oleaje sobre la margen izquierda del embalse

TR (años)	Altura de ola significativa H_s (m)															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
2	0.71	0.76	0.83	0.86	0.88	0.48	0.77	0.48	0.52	0.46	0.68	0.58	0.70	0.52	0.57	0.63
5	0.83	0.88	0.97	1.03	1.04	0.71	0.87	0.56	0.63	0.53	0.80	0.74	0.93	0.66	0.71	0.77
10	0.88	0.95	1.06	1.13	1.14	0.75	0.93	0.63	0.70	0.58	0.86	0.84	1.06	0.75	0.80	0.84
20	0.94	1.02	1.13	1.22	1.23	0.81	0.98	0.69	0.76	0.62	0.89	0.94	1.11	0.84	0.89	0.94
50	1.02	1.12	1.23	1.33	1.33	0.87	1.05	0.78	0.85	0.69	0.92	1.06	1.14	0.95	1.01	1.04
100	1.08	1.17	1.31	1.41	1.40	0.92	1.11	0.83	0.91	0.73	0.94	1.15	1.21	1.02	1.08	1.13

De la Tabla 4.2 surge que las olas con mayores alturas que podrían incidir sobre la obra de cierre corresponden a las generadas por vientos de las direcciones E y S, con valores de $H_s = 1.26$ m y $H_s = 1.25$ m para un período de retorno $Tr = 100$ años, respectivamente. Asimismo, las olas generadas por viento de dirección W podrían alcanzar alturas $H_s = 1.23$ m, aunque de acuerdo con la orientación de la costa en ese tramo el efecto sobre la estructura sería de menor importancia.

Sobre la margen derecha (Tabla 4.3) el oleaje más severo resulta de los vientos de dirección S, con un valor máximo estimado de $H_s = 1.65$ m para el período de retorno $Tr = 100$ años.

Por su parte, para la margen izquierda (Tabla 4.4) las mayores alturas de ola serán generadas por vientos de las direcciones NE, ENE y E, estimándose un valor máximo de $H_s = 1.41$ m para $Tr = 100$ años.

Como complemento se presentan gráficos de envolventes, 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 4.6**. Envolvente de altura de ola H_s (m) sobre la progresiva de cierre del embalse. La **Figura 4.6** a la **Figura 4.8** 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, cuyos puntos de inicio y fin para cada tramo se indican en la **Figura 4.5**.

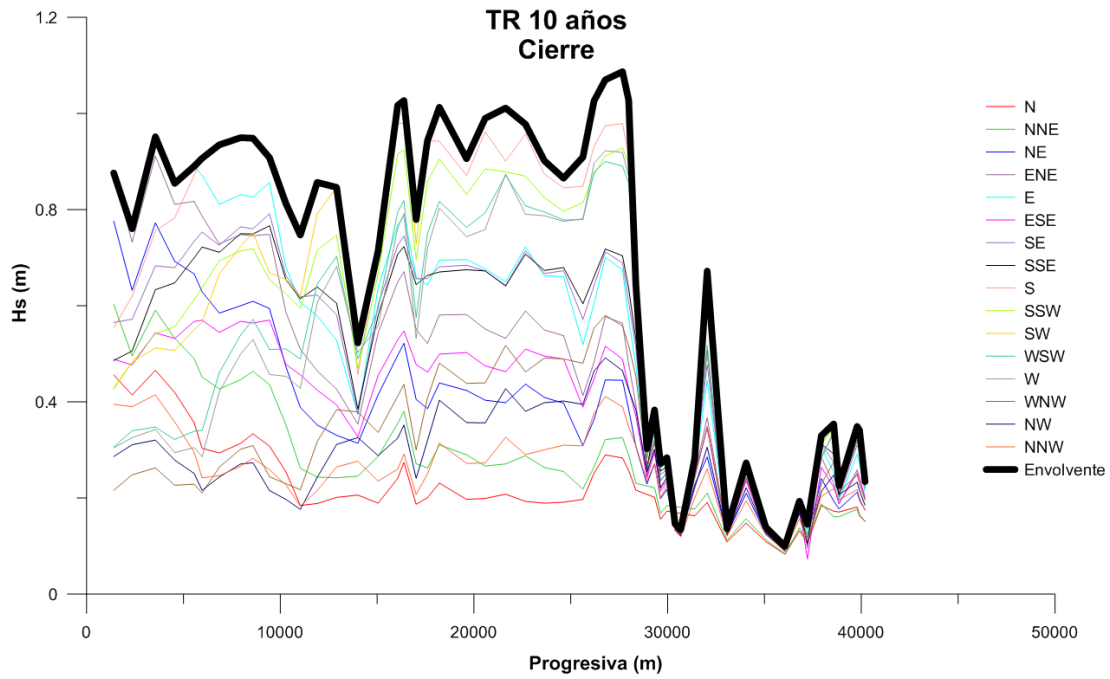


Figura 4.6. Envolvente de altura de ola H_s (m) sobre la progresiva de cierre del embalse

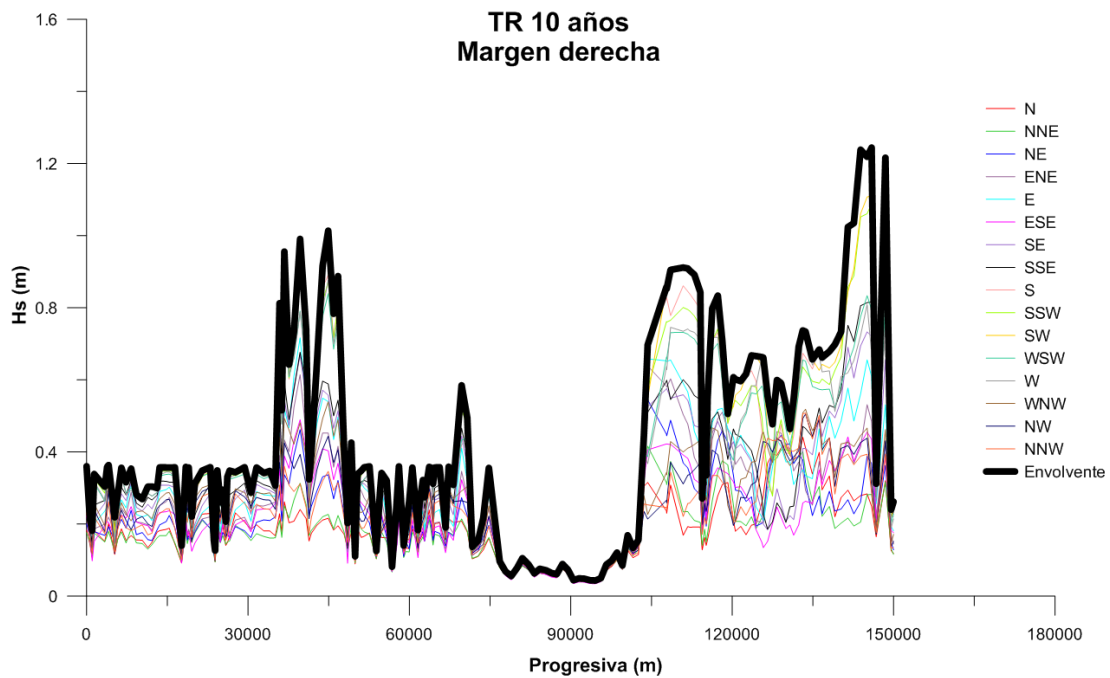


Figura 4.7. Envolvente de altura de ola H_s (m) a lo largo de la margen derecha del embalse

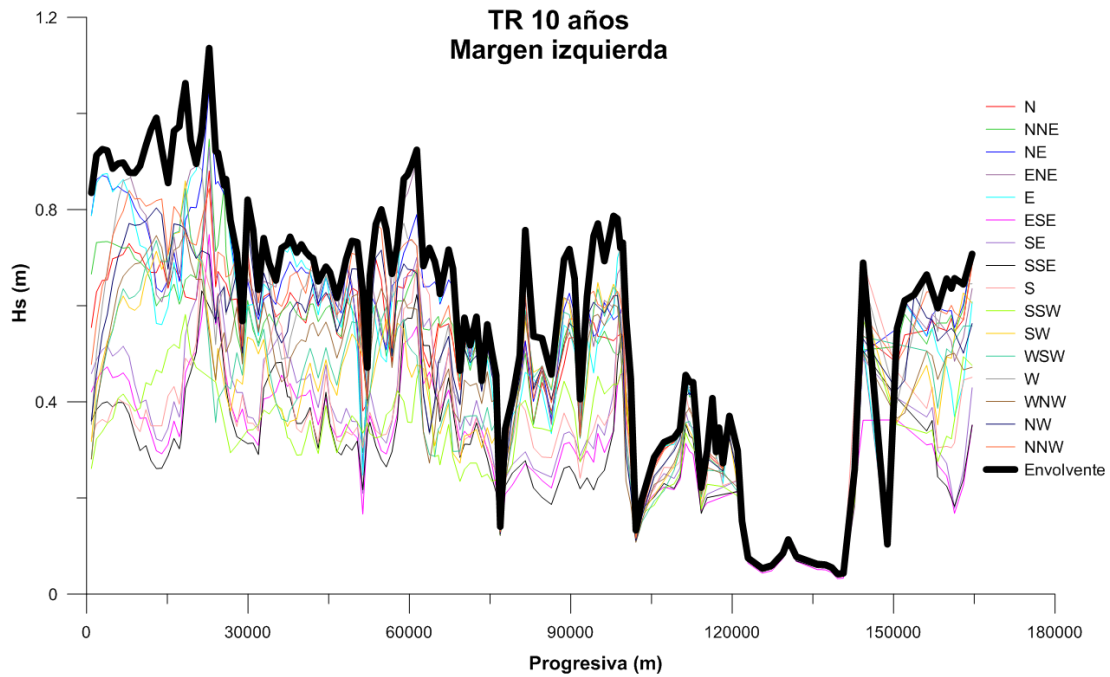


Figura 4.8. Envoltura de altura de ola H_s (m) a lo largo de la margen izquierda del embalse

Finalmente, la Figura 4.9 y la Figura 4.10 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 4.9. Altura de ola H_s (m) sobre el contorno del embalse para $Tr = 10$ años



Figura 4.10. Altura de ola H_s (m) sobre el contorno del embalse para $T_r = 100$ años

4.6 Metodología de cálculo de erosión potencial

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 topobatimétrica que permita adecuar el perfil correspondiente al modelo de esquema simplificado presentado en la **Figura 4.11**. 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.

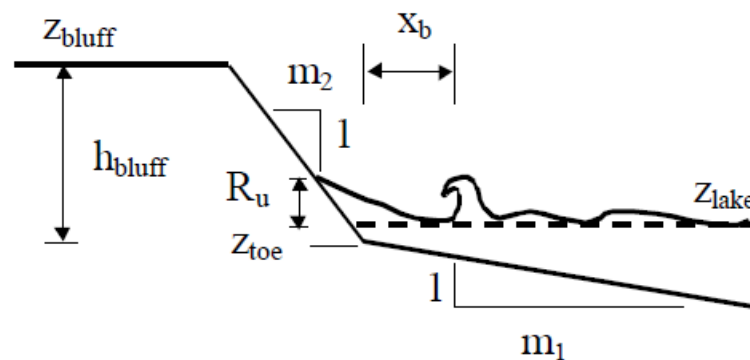


Figura 4.11. Esquema de la geometría simplificada para la sección de cálculo de la erosión

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 4.12.

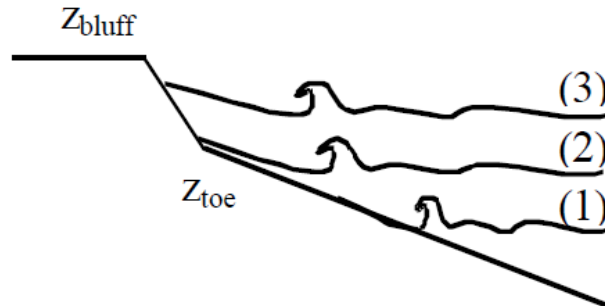


Figura 4.12. Casos considerados para la metodología de predicción de la erosión

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:

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

donde

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

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 (= $3.4 \cdot 10^{-3}$).
- κ : 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:

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

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

4.7 Predicción de erosión potencial

4.7.1 Planteo

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, realizada en la sección 4.5, 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 4.13**, 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).

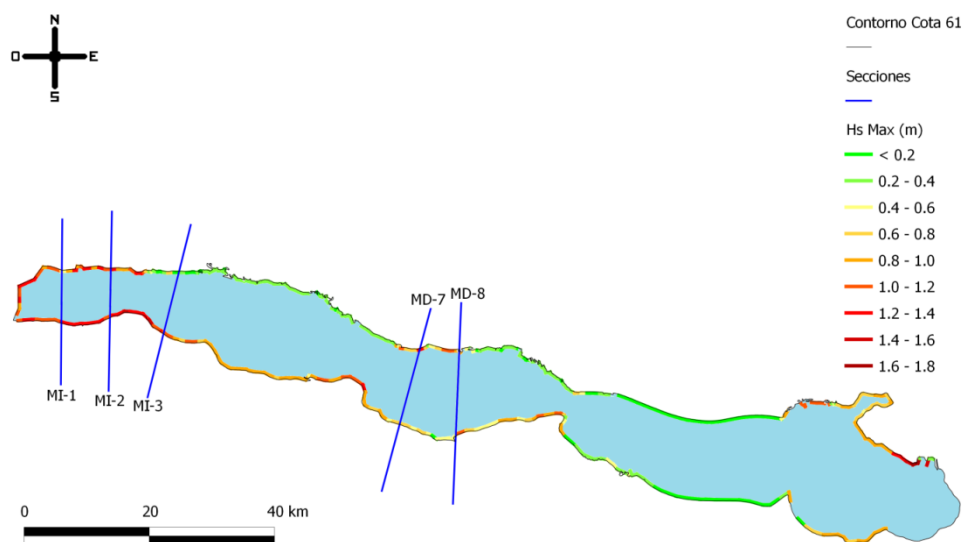


Figura 4.13. Secciones seleccionadas para la predicción de erosión (H_s indicada para $T_r = 100$)

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 de 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 4.5** 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 4.5. 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

4.7.2 Resultados sobre la margen izquierda

Las secciones indicadas en la Figura 4.13 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 4.14** muestra el grado de aproximación entre el perfil natural del terreno y el modelo simplificado correspondiente a la ubicación MI-2.

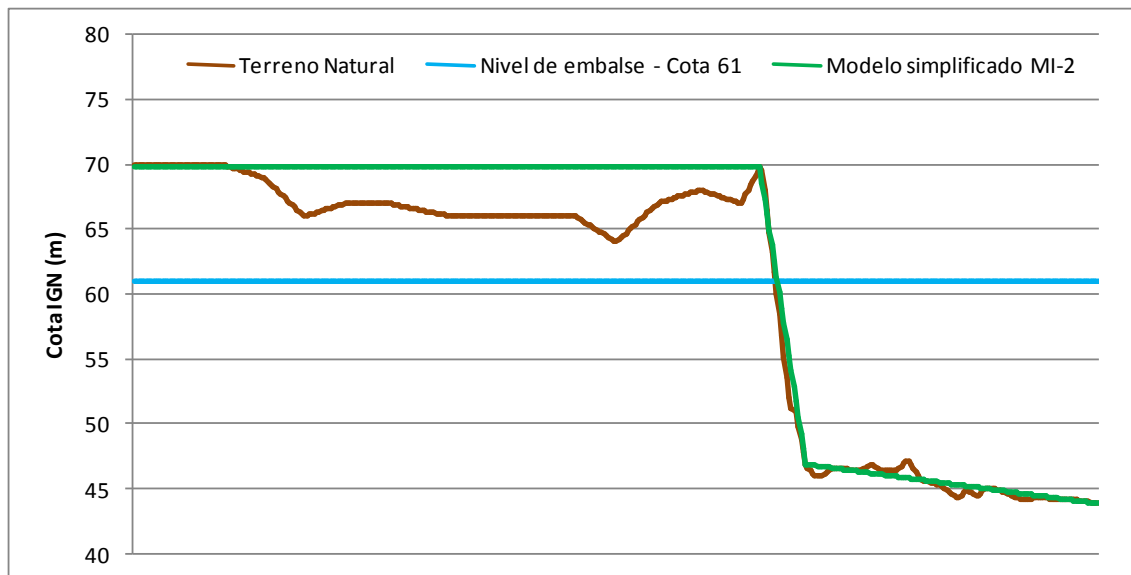


Figura 4.14. Modelo simplificado para la sección MI2

La Tabla 4.6 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 4.6. 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 4.12.

La **Figura 4.15** 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.

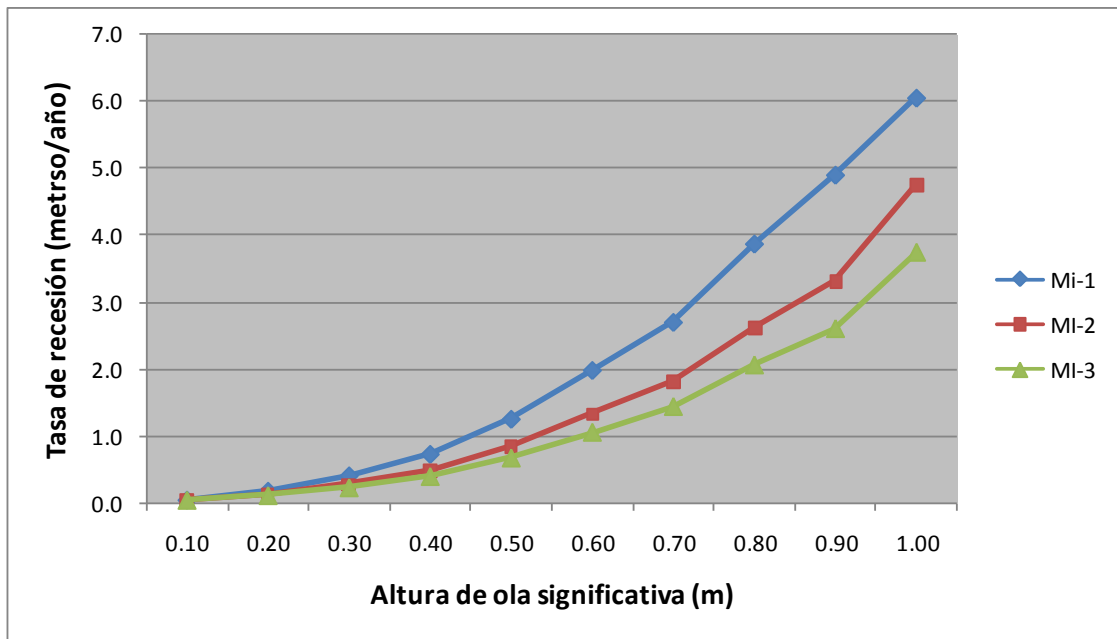


Figura 4.15. Estimación de valores de tasa de recesión R (m/año) de referencia

Si se utilizan como base de comparación los valores medios anuales del oleaje registrado en Yacyretá (**Tabla 4.5**), 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 4.7**.

Tabla 4.7. 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 cómo más expuesta a la acción erosiva del oleaje.

4.7.3 Resultados sobre la margen derecha

El mismo procedimiento de cálculo fue implementado para estimar tasas de recesión anual sobre la margen derecha del embalse. La **Figura 4.16** muestra las diferencias entre las secciones seleccionadas para el cálculo y ajuste entre el perfil natural del terreno y el modelo simplificado.

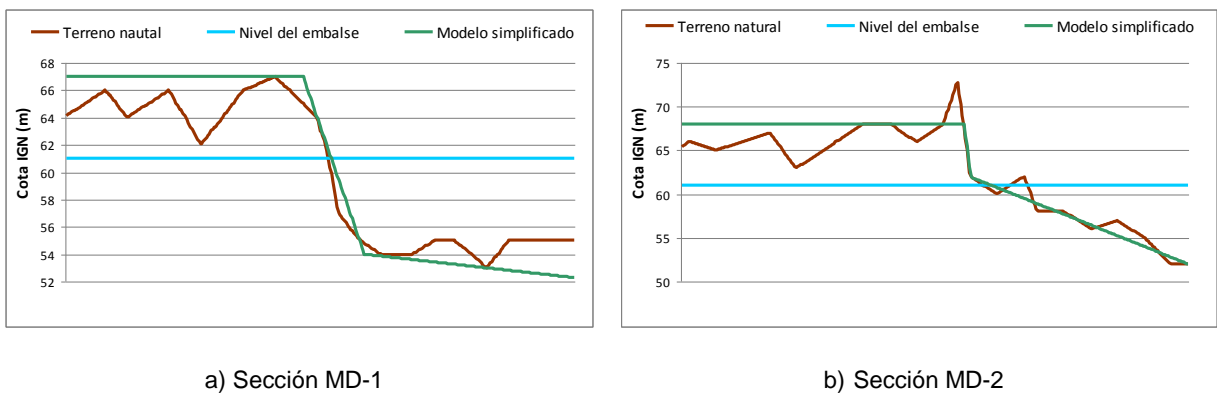


Figura 4.16. Secciones de cálculo sobre margen derecha

La Tabla 4.8 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 4.8. 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 (Figura 4.16) 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 4.12, 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 4.9.

Tabla 4.9. 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 APOORTE HIDROLÓGICO

5.1 Estrategia de estudio

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.

En este Primer Informe Parcial se presentan resultados preliminares para el aporte hidrológico desde la margen izquierda.

5.2 Datos de base

Para implementar la modelación hidrológica se utilizó la siguiente información de base:

- Modelo Digital de Elevación (MDE) del terreno, que fue descrito en el Capítulo 2.
- Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) en la estación Pilar y Encarnación, situadas en Paraguay. Estas curvas fueron generadas por Cuevas & Rolón (2010) en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción.
- Inventario de Suelos de la República Argentina, descargado del Sistema de Gestión de Datos Espaciales del INTA[§]. Este inventario proporciona una clasificación de los suelos y evaluación de las tierras de Argentina. Para la zona en estudio la escala gráfica es 1:500.000.

[§] <http://geointa.inta.gov.ar>

5.3 Modelación hidrológica

5.3.1 Software

La modelación hidrológica se implementó utilizando el software HEC-HMS^{**}, 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.

5.3.2 Dominio de modelación

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 5.1** se visualiza el área de aporte hidrológico, bastante más significativo sobre la margen derecha (Paraguay) que sobre la izquierda (Argentina).

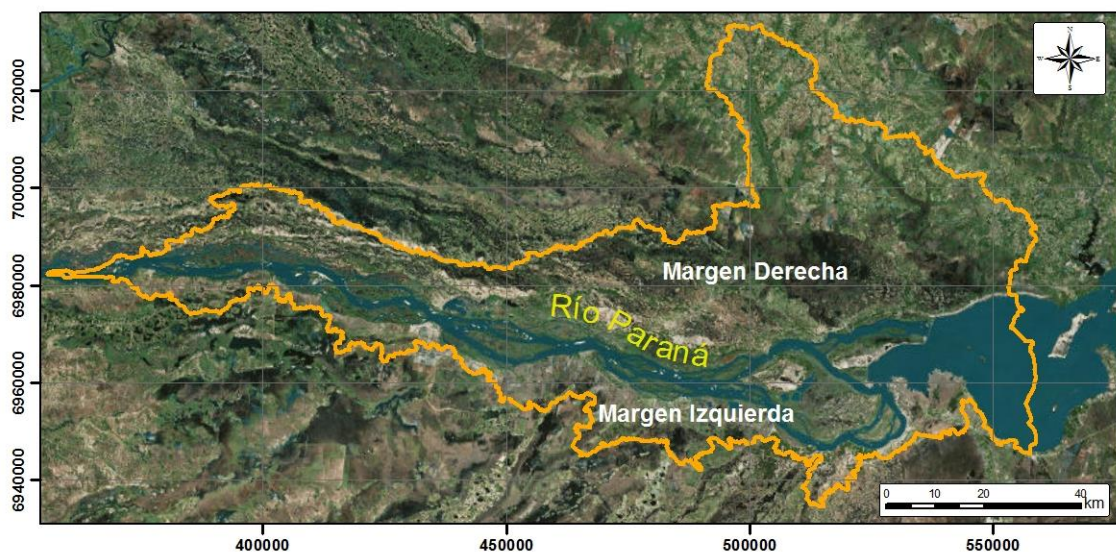


Figura 5.1. Dominio de modelación

5.3.3 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

^{**} <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

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 escorrentía 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-GeoHMS^{††}. Es una extensión de ArcGIS^{‡‡} 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.

5.3.4 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”.

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. Las 4 subcuencas obtenidas para la margen izquierda (Argentina), MII a MIV, se muestran en la **Figura 5.2**.

^{††} <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/>

^{‡‡} <http://www.esri.com/software/arcgis>

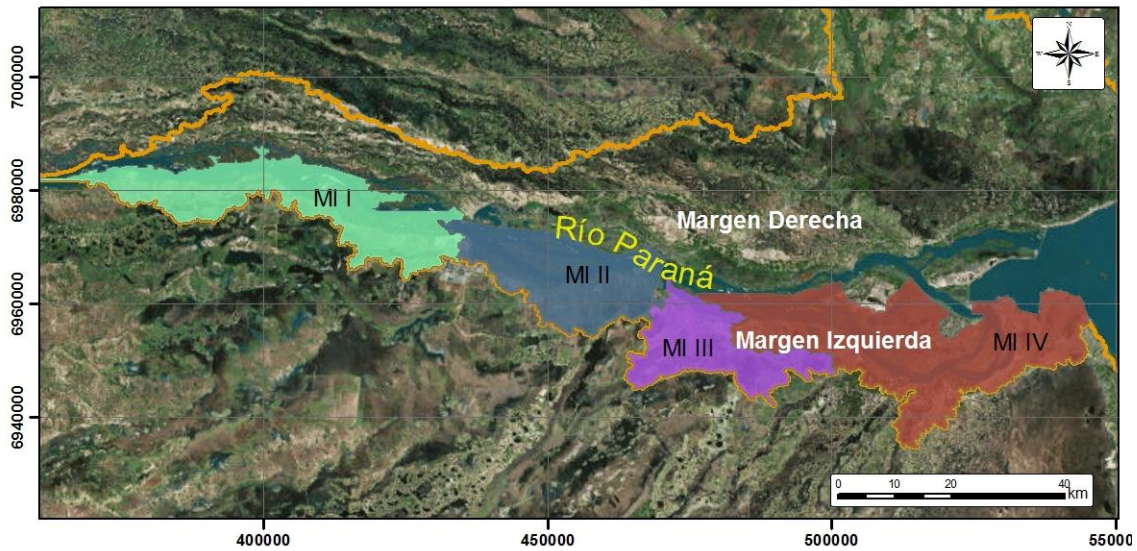


Figura 5.2. Subcuencas de la Margen Izquierda

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. Se determinaron el área, la longitud de los cauces más extensos y la pendiente media de dichos cauces para la margen izquierda. Esta información se visualiza en la **Tabla 5.1**.

Tabla 5.1. Características topográficas de las subcuencas.

Subcuenca	Area (km ²)	Long (km)	Pend (%)
MI I	575	72	0.030
MI II	440	37	0.054
MI III	315	45	0.046
MI IV	869	70	0.041

5.3.5 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.

Para determinar la tormenta de diseño se contó con las curvas IDF de Encarnación y Pilar. Estas curvas fueron construidas para períodos de retorno de 1, 5, 10, 15, 20, 25, 100 y 150 años, y duraciones que van desde 5 hasta 180 minutos. En la **Figura 5.3** se muestra la IDF de Encarnación para algunos de los períodos de retorno citados.

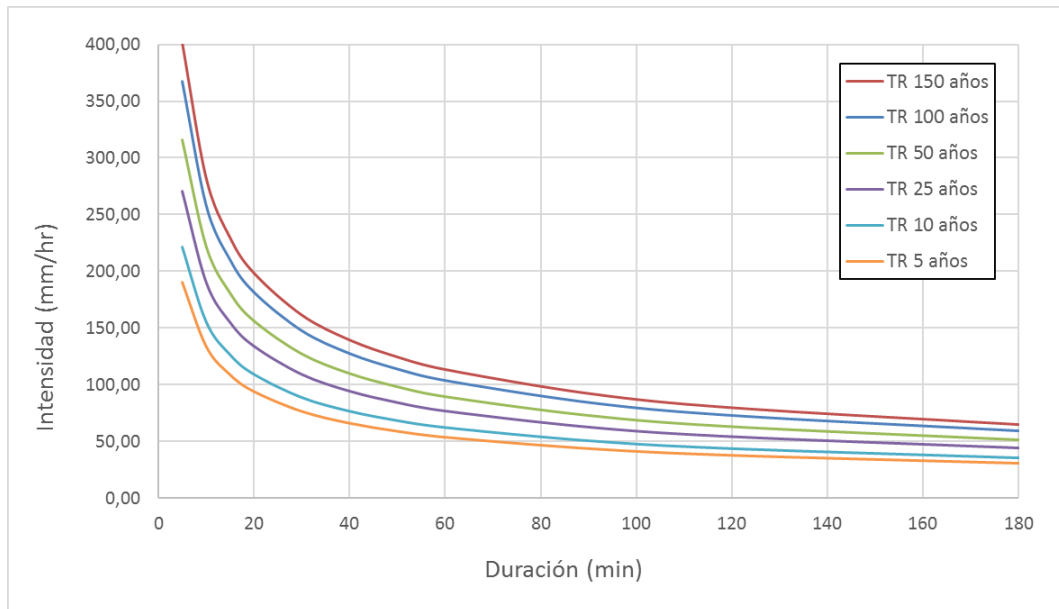
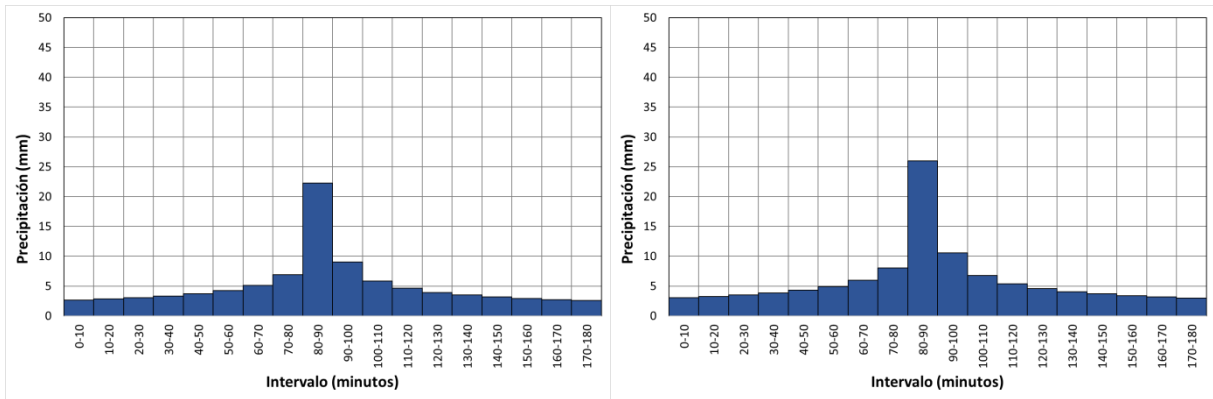


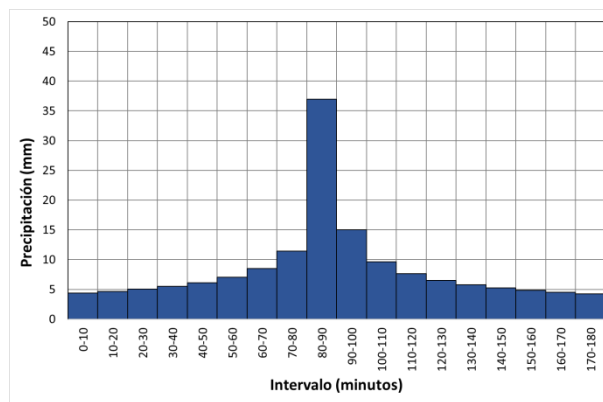
Figura 5.3. Curva IDF de Encarnación

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. La duración total de la tormenta se ha considerado de 3 horas, y se han seleccionado las recurrencias corresponden a 5, 10 y 50 años. En la **Figura 5.4** se muestran los bloques alternos para dichas recurrencias.



a) $Tr = 5$ años

b) $Tr = 10$ años



c) $Tr = 50$ años

Figura 5.4. Bloques Alternos

5.3.6 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-limosa).
- 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).

5.3.7 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 se determina con la fórmula de Kirpich (1940):

$$T_c = 0.02 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

donde T_c es el tiempo de concentración en minutos, L es la longitud del curso principal en metros y S la pendiente media del lecho en m/m.

5.3.8 Resultados

En la **Figura 5.5**. Esquema de modelación **Figura 5.5** se esquematizan las 4 subcuencas.

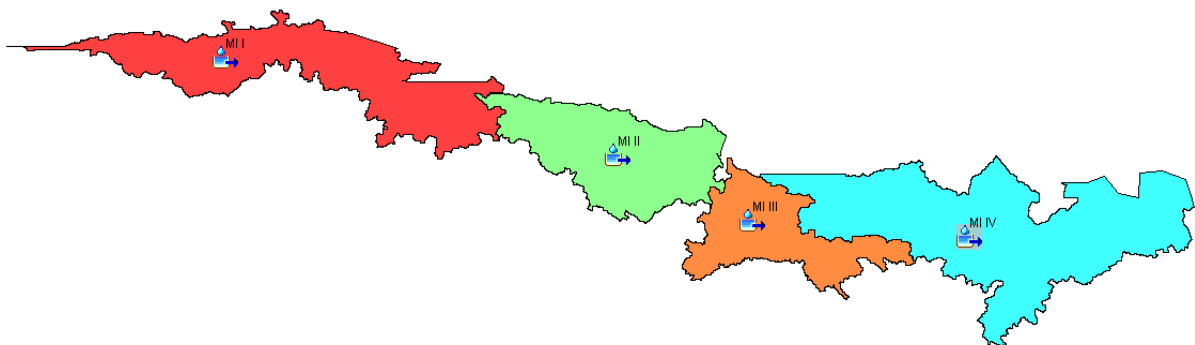


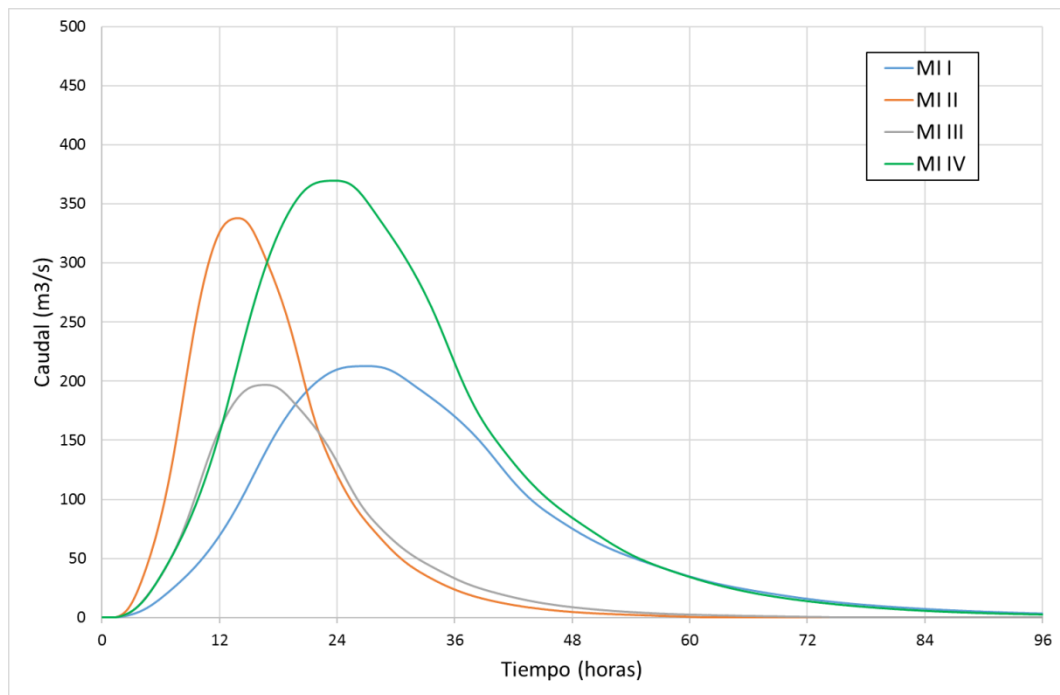
Figura 5.5. Esquema de modelación

Los datos utilizados en la modelación se presentan en la **Tabla 5.2**. Los tiempos de retardo se han obtenido con las fórmulas citadas en el apartado anterior. En función del tipo de suelo, cobertura y condición hidrológica, se ha seleccionado preliminarmente el valor $CN = 80$.

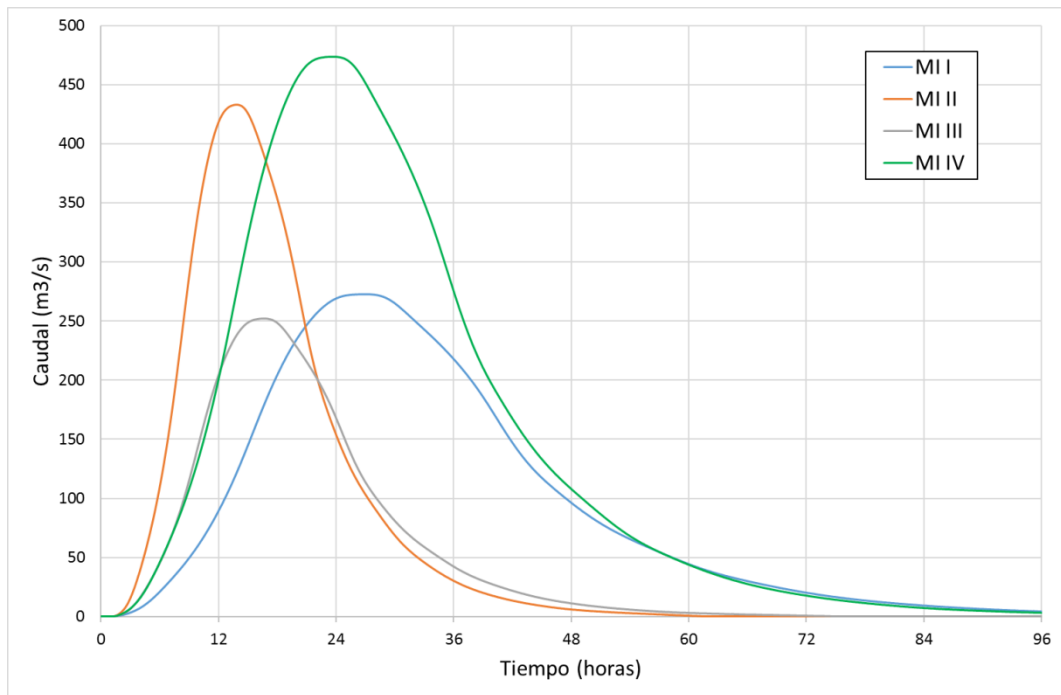
Tabla 5.2. Datos utilizados para la modelación.

Subcuenca	Area (km ²)	Tlag (min)	CN
MI I	575	1488	80
MI II	440	715	80
MI III	315	880	80
MI IV	869	1295	80

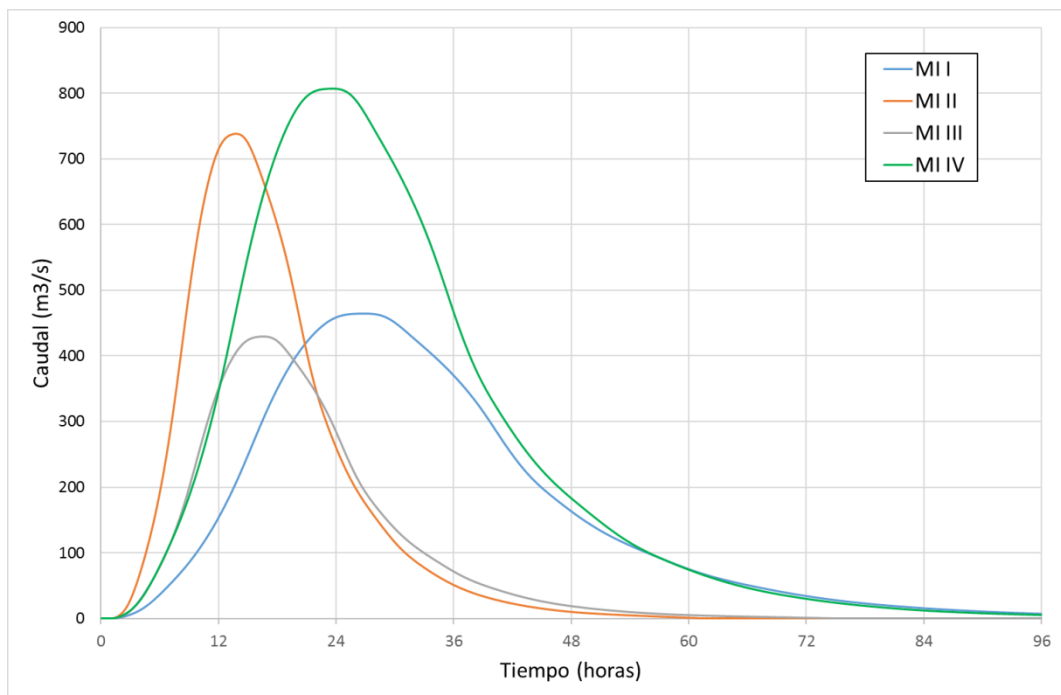
A título ilustrativo, en la **Figura 5.6** se muestran los hidrogramas para cada subcuenca asociados a los períodos de retorno de 5, 10 y 50 años. Se observa que los caudales pico varían en el rango de 100 a 1000 m³/s.



a) $Tr = 5$ años



b) $Tr = 10$ años



c) $Tr = 50$ años

Figura 5.6. Hidrogramas para distintas recurrencias

6 CONCLUSIONES

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

- 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.
- 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 tomará como curva clave en Itatí-Itacorá para este estudio.
- 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.
- El aporte hidrológico a la zona del embalse de Itatí – Itacorá desde la margen izquierda, para tormentas de 3 horas de duración y recurrencias de 5 a 50 años, tiene asociado caudales pico que varían en el rango de 100 a 1000 m³/s para cada una de las 4 subcuencas identificadas.

REFERENCIAS

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.

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.

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, 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.

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

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.

Kirpich, Z. (1940). Time of concentration in small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10 (6): 362-, 1940.

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

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

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

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.