



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

Cuarto Informe Parcial



Proyecto LHA370
Informe LHA 06-370-18
Ezeiza, Setiembre de 2018

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Ing. Pablo SPALLETTI

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO (Orden alfabético)

INA

Ing. Nicolás D. BADANO

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

Ing. Emilio LECERTÚA

Ing. Nicolás TOMAZÍN

Paraguay

Ing. Mag. Cristian ESCOBAR JARITÓN

Ing. Benito PEREIRA

ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO ITATÍ-ITACORÁ

Cuarto Informe Parcial

RESUMEN

Se presentan estadísticas climatológicas, a partir de las cuales se estima el balance hídrico en el futuro embalse de Itatí-Itacorá. Se utiliza el modelo hidrodinámico para determinar indicadores de cambio en las condiciones de navegabilidad (velocidades, tirantes), en el acarreo de fondo en el futuro embalse de Itatí-Itacorá, y de acción erosiva sobre las márgenes. Se sugiere la ubicación de una red de hidrómetros complementaria para monitoreo.

Descriptores temáticos: Estadísticas climatológicas. Modelación hidrodinámica. Erosión de márgenes. Red de monitoreo.

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

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS	6
2.1	Generalidades	6
2.2	Estadísticas	7
2.2.1	Precipitación	7
2.2.2	Temperatura	7
2.2.3	Humedad Relativa	8
2.2.4	Vientos	9
2.3	Evaporación	9
2.4	Balance hídrico	12
2.5	Análisis de vientos	13
2.5.1	Datos de base	13
2.5.2	Intensidad y dirección	13
2.5.3	Valores extremos	15
2.5.4	Análisis de persistencia	16
2.5.5	Análisis para el registro de San Cosme	18
3	NAVEGACIÓN	21
3.1	Planteo del problema	21
3.2	Ensayos a caudal constante	21
3.3	Ensayos con empuntamiento en las centrales	26
4	EROSIÓN	32
4.1	Acarreo de fondo en embalse	32

4.2	Acción erosiva sobre márgenes	34
5	RED DE MONITOREO	35
5.1	Objetivo de revisión	35
5.2	Red actual	35
5.3	Red propuesta	37
6	CONCLUSIONES	41
7	REFERENCIAS	43

1 INTRODUCCIÓN

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

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

Los principales objetivos del estudio son los siguientes:

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

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

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

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

En el Tercer Informe Parcial 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 este Cuarto Informe Parcial se presentan los siguientes resultados:

- Estadísticas climatológicas, a partir de las cuales se estima el balance hídrico en el futuro embalse de Itatí-Itacorá.
- Indicadores de navegabilidad.
- Acarreo de fondo en el futuro embalse de Itatí-Itacorá.
- Indicadores de acción erosiva sobre las márgenes.
- Ubicación sugerida de una red de hidrómetros para monitoreo.

2 CONDICIONES CLIMATOLÓGICAS

2.1 Generalidades

Para el análisis estadístico de los datos climáticos y el balance hídrico se utiliza la información correspondiente a la estación meteorológica Corrientes (Aeropuerto) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (**Figura 2.1**). Se cuenta 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

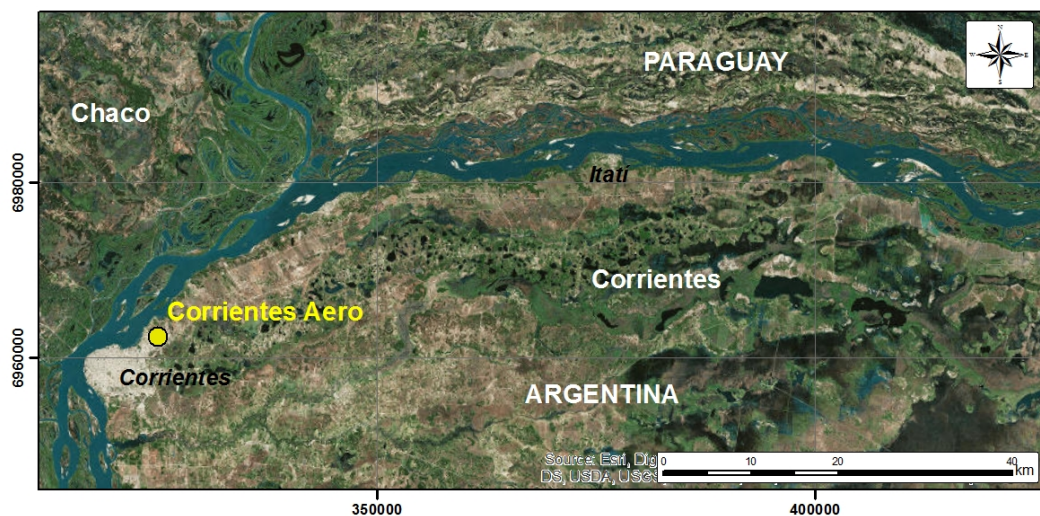


Figura 2.1. Ubicación de estación meteorológica Corrientes (SMN)

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 2.2** 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.

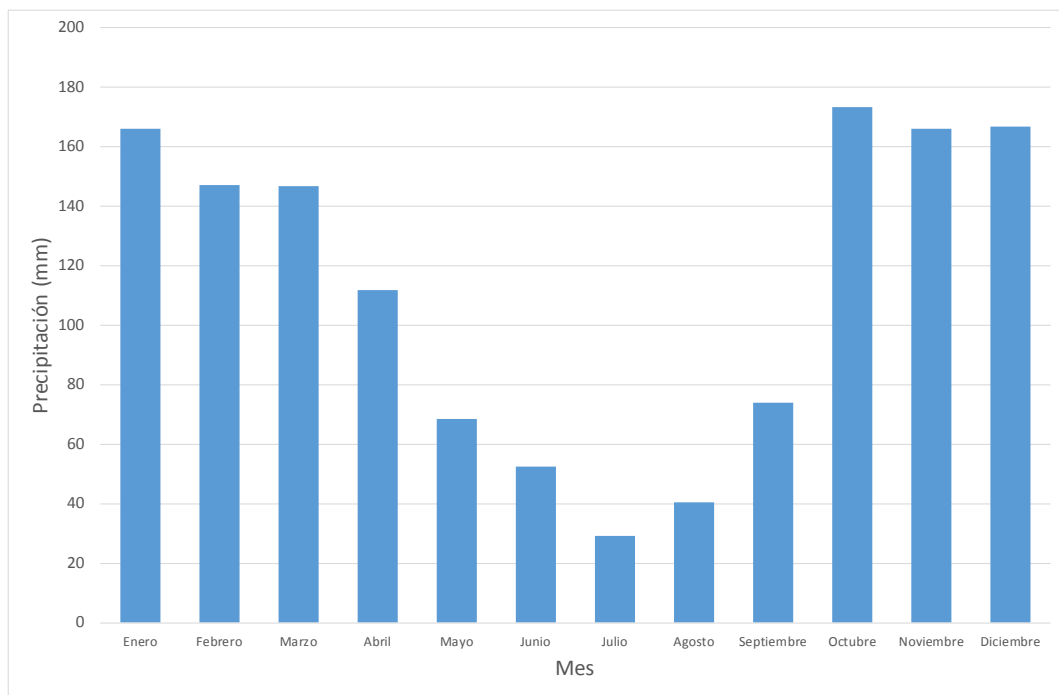


Figura 2.2. Precipitación media mensual en la estación Corrientes (2006-2015)

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 2.3** 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.

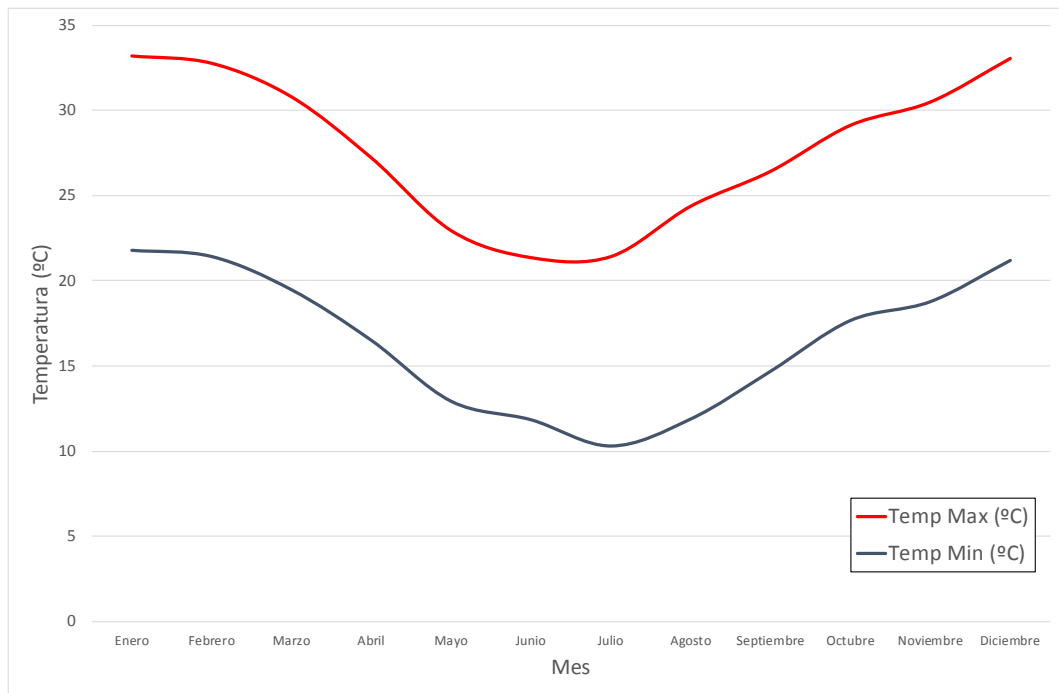


Figura 2.3. Temperatura mínima y máxima media mensual en la estación Corrientes (2006-2015)

2.2.3 Humedad Relativa

El clima es húmedo, con altos valores de humedad durante todo el año. En la **Figura 2.4** se muestra el correspondiente gráfico de la Humedad Relativa, cuya media anual es de aproximadamente 72%.

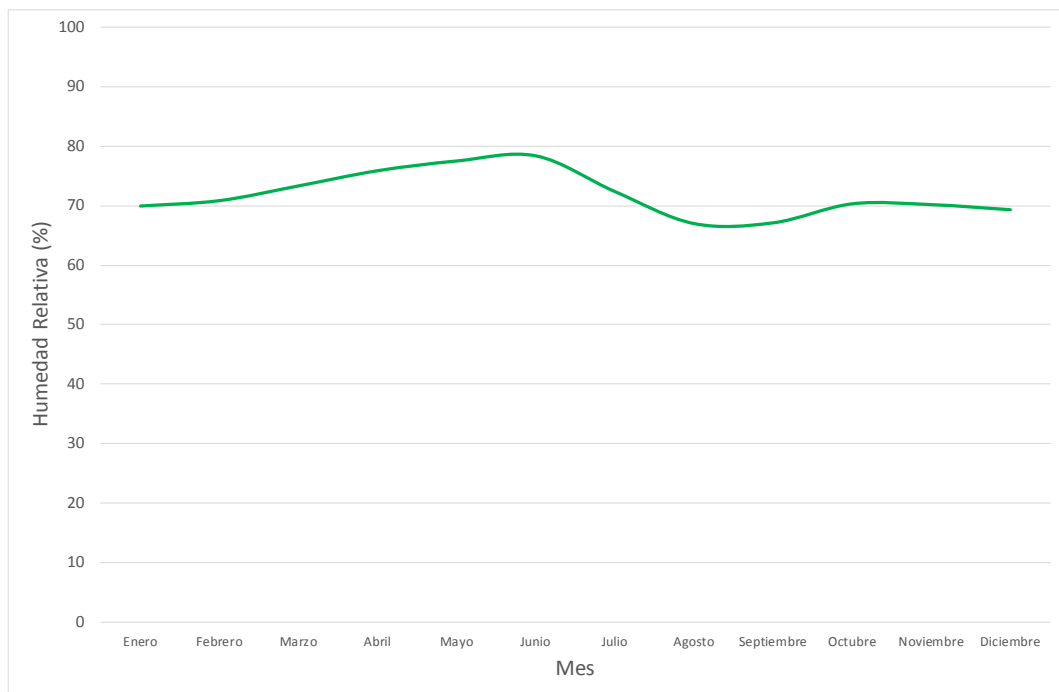


Figura 2.4. Humedad Relativa media mensual en la estación Corrientes (2006-2015)

2.2.4 Vientos

En la **Figura 2.5** 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.

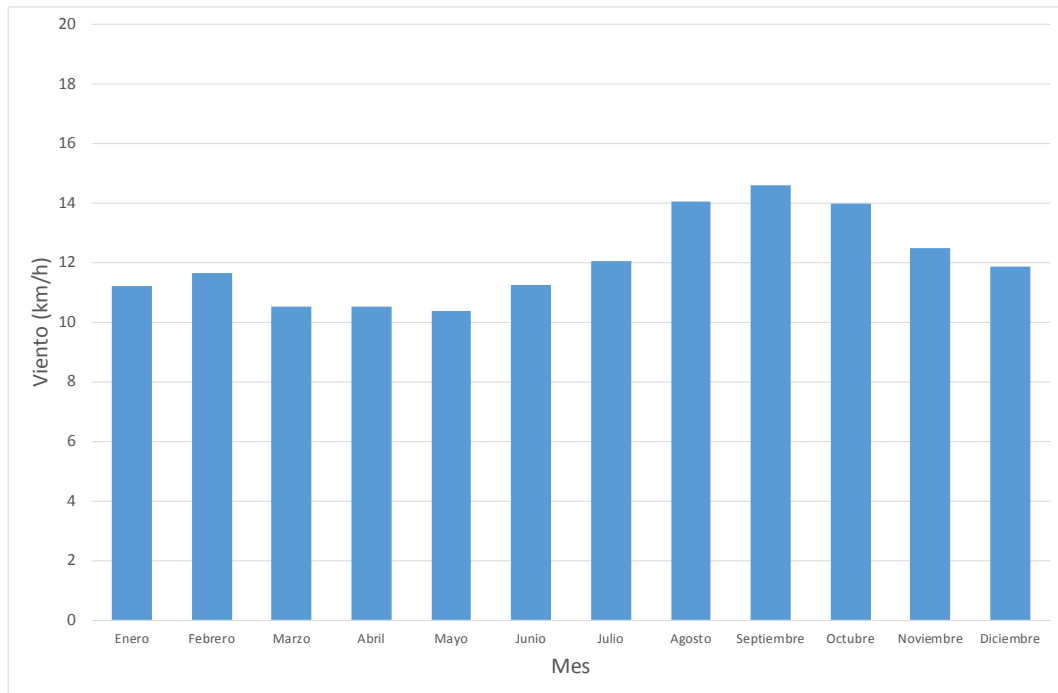


Figura 2.5. Viento medio mensual en la estación Corrientes (2006-2015)

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/m²/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, 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 (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 2.6** 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.

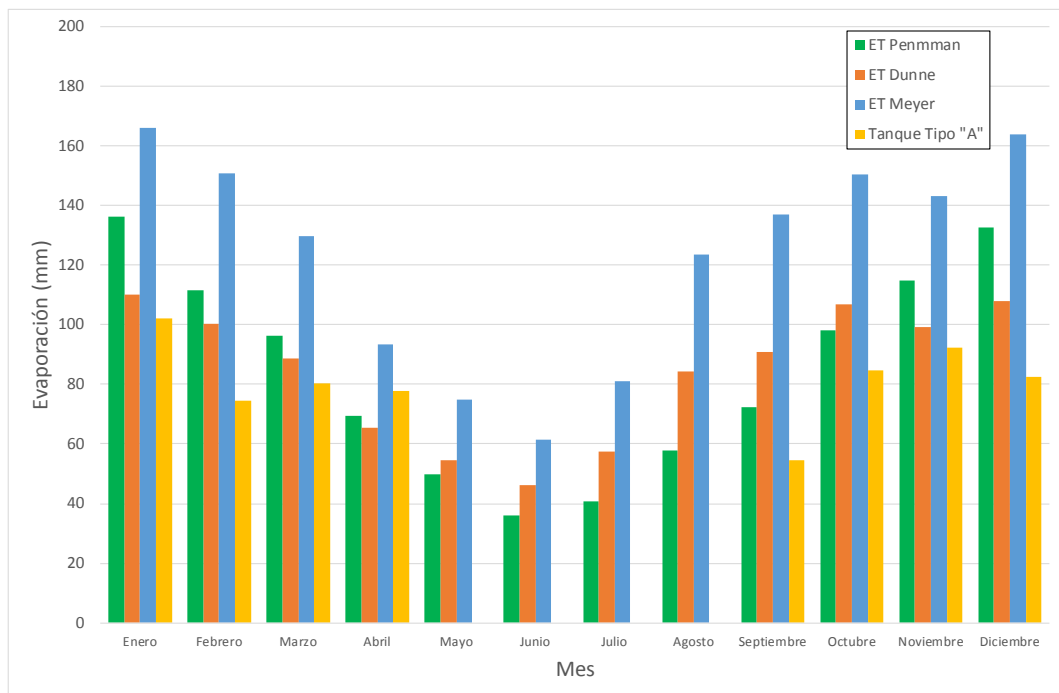


Figura 2.6. Evaporación media mensual con diferentes métodos

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 (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 2.7**. 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 2.7. 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 Yacretá. 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 2.1**. De ellas surgen los histogramas presentados en la **Figura 2.8** y la **Figura 2.9**, respectivamente. Las frecuencias se refieren al total de datos válidos.

Tabla 2.1. 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
--------------	-------------

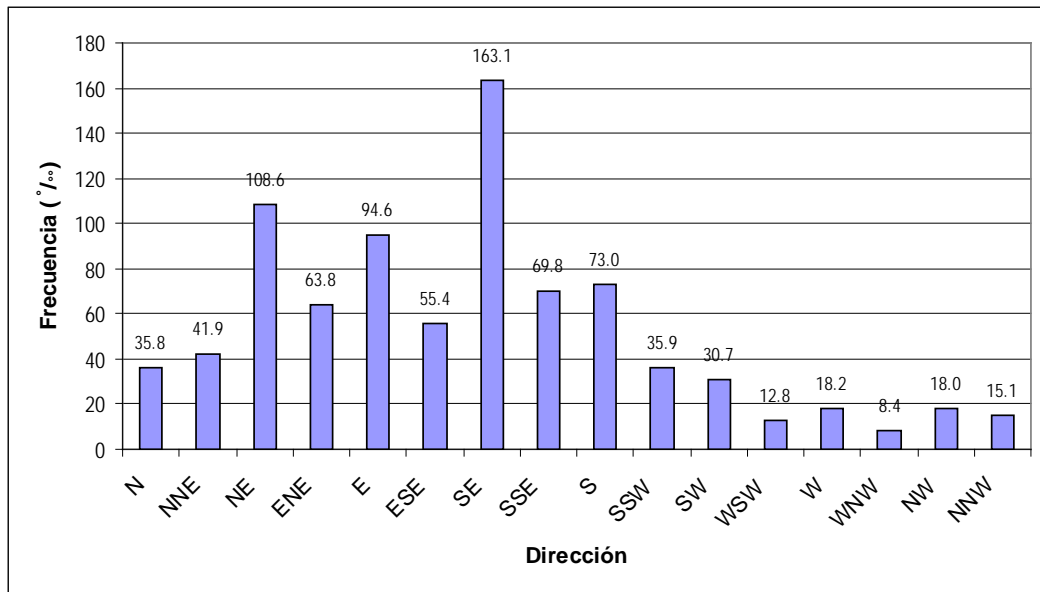


Figura 2.8. Histograma de dirección de viento. Posadas 1991-2016

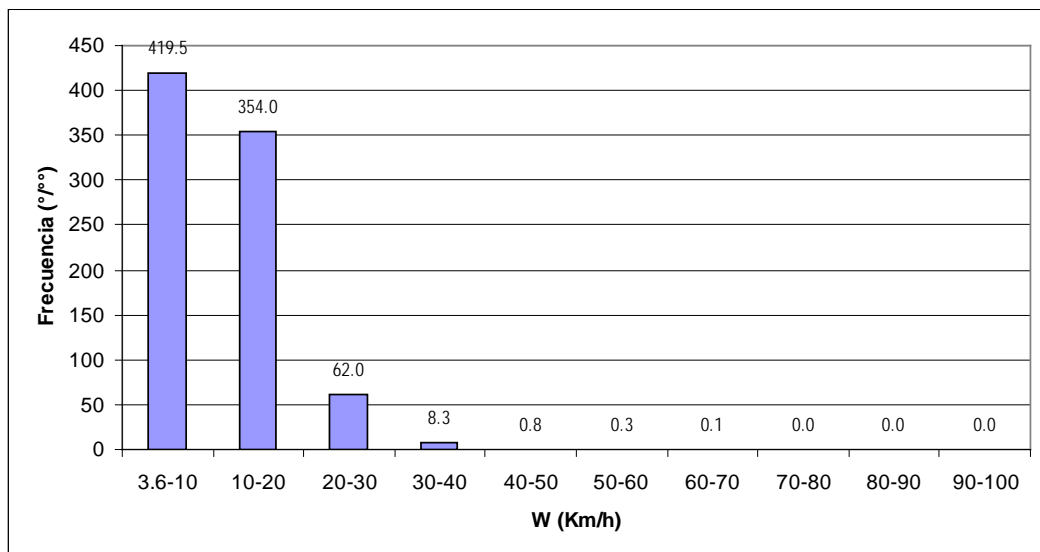
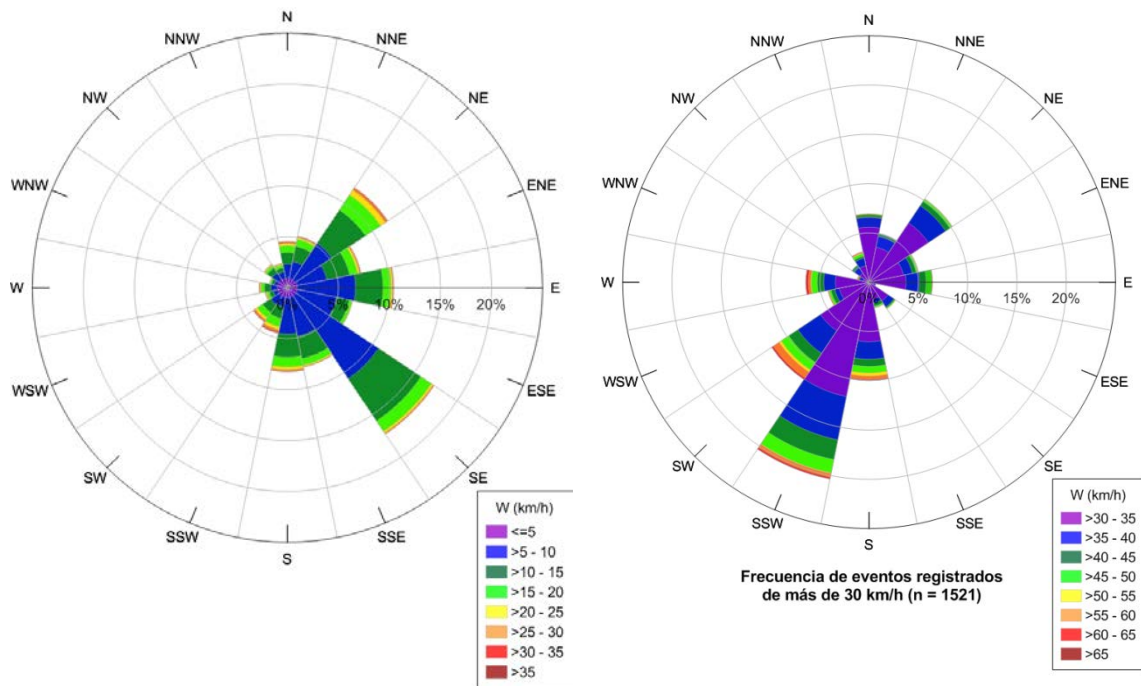


Figura 2.9. Histograma de intensidad de viento. Posadas 1991-2016.

En la **Figura 2.8** 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 2.9** 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').

La **Figura 2.10** 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.



a) Totalidad de los datos

b) Valores superiores a $W=30$ km/h

Figura 2.10. 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 2.2** 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 2.3**.

Tabla 2.2. 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	54.0	30.0	33.0	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 2.3. 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 2.4**.

Tabla 2.4. 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			
		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 2.11** muestra en forma de histograma una síntesis del análisis de persistencia, señalando las duraciones media y máxima de eventos correspondientes a diferentes intensidades.

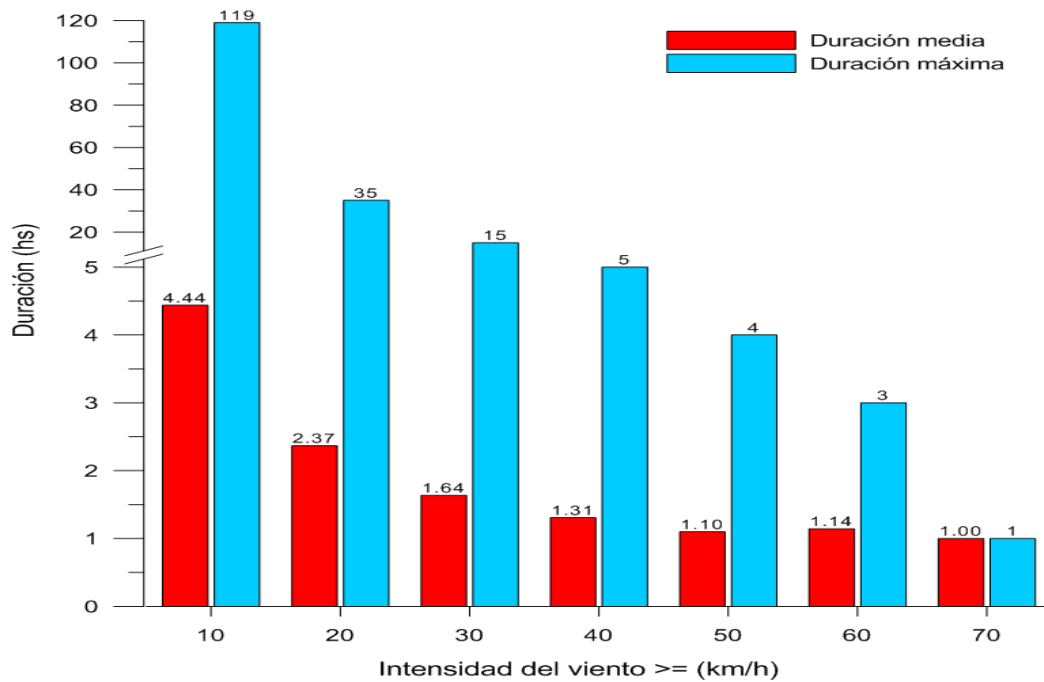


Figura 2.11. Duración media del viento para distintas intensidades.

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 2.12**. 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.

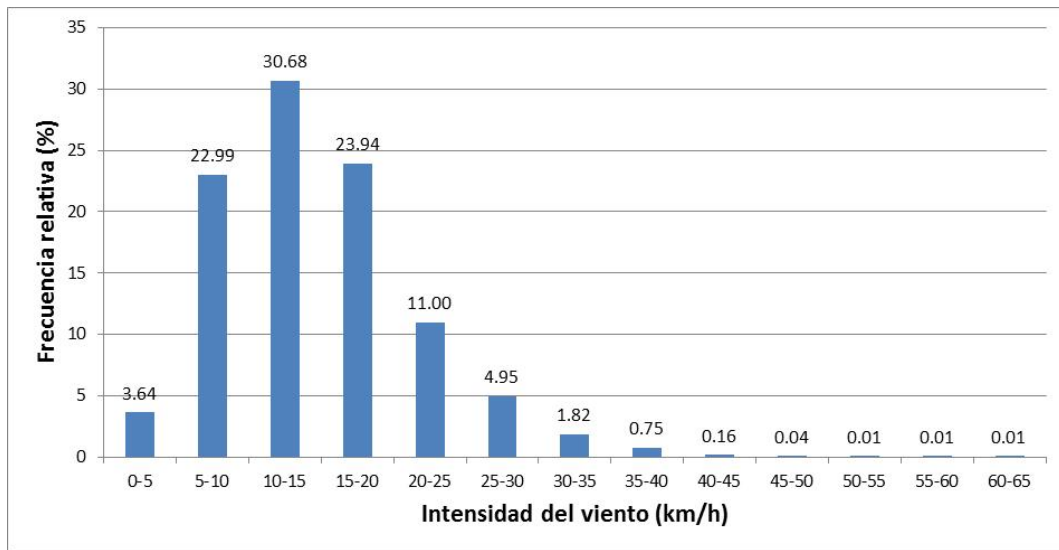


Figura 2.12. Distribución por rangos de intensidad del viento en San Cosme.

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 2.5**. La **Figura 2.13** muestra el histograma con las duraciones media y máxima correspondiente a cada rango de intensidad analizado.

Tabla 2.5. 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

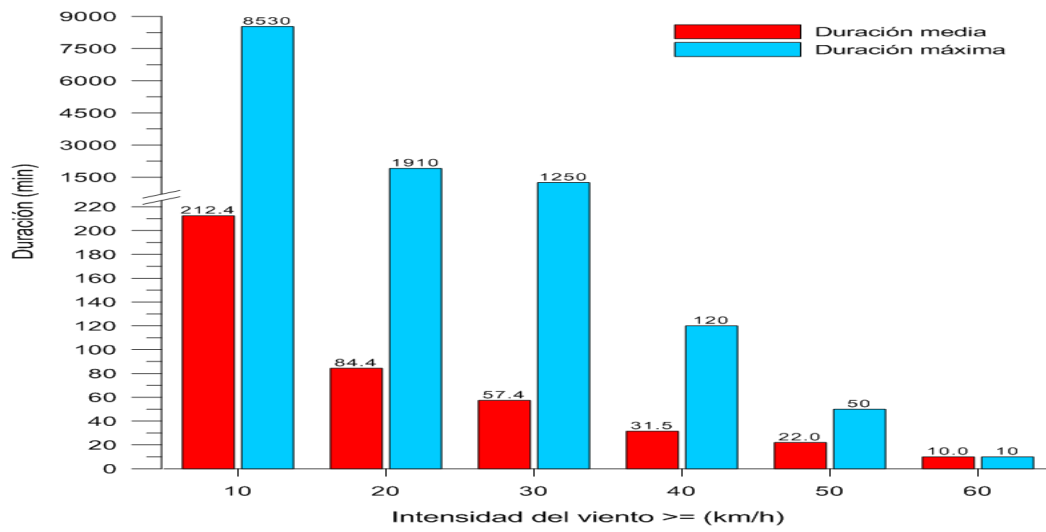


Figura 2.13. Duraciones media y máxima para distintas intensidades.

3 NAVEGACIÓN

3.1 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 3.1** 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 3.1. Ubicación de los pasos críticos del río Paraná en el tramo Corrientes - Posadas.

3.2 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.

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 3.2** para el caudal ‘medio’ y en la **Figura 3.3** 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%. Si bien, según datos suministrados por COMIP, las embarcaciones que transitan este tramo del Paraná encuentran velocidades algo superiores a 1.0 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.

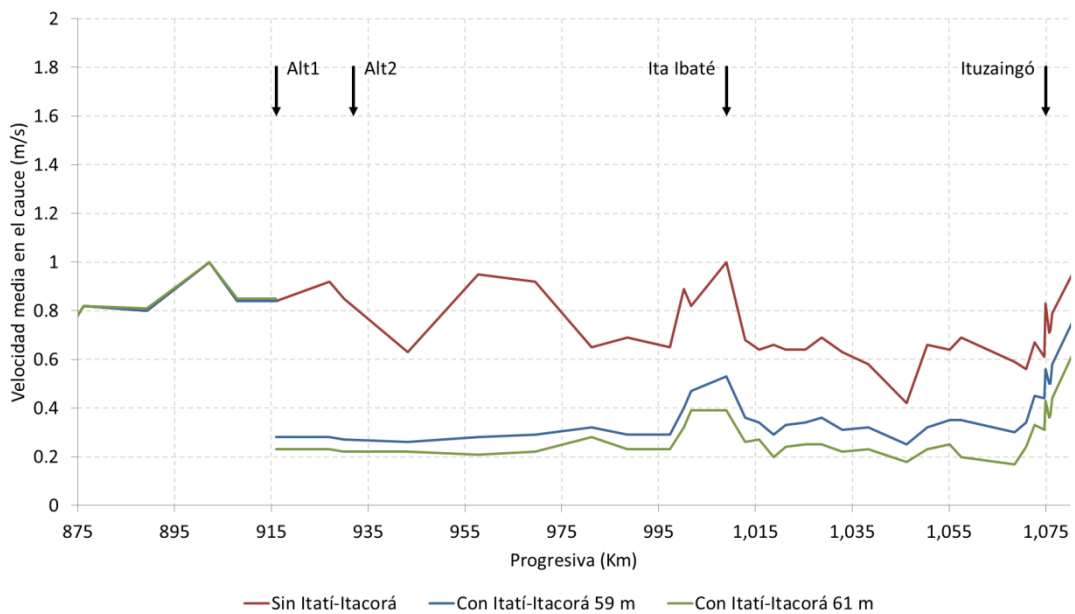


Figura 3.2. Perfil de velocidad para un caudal de 14.735 m³/s en distintos escenarios de proyecto.

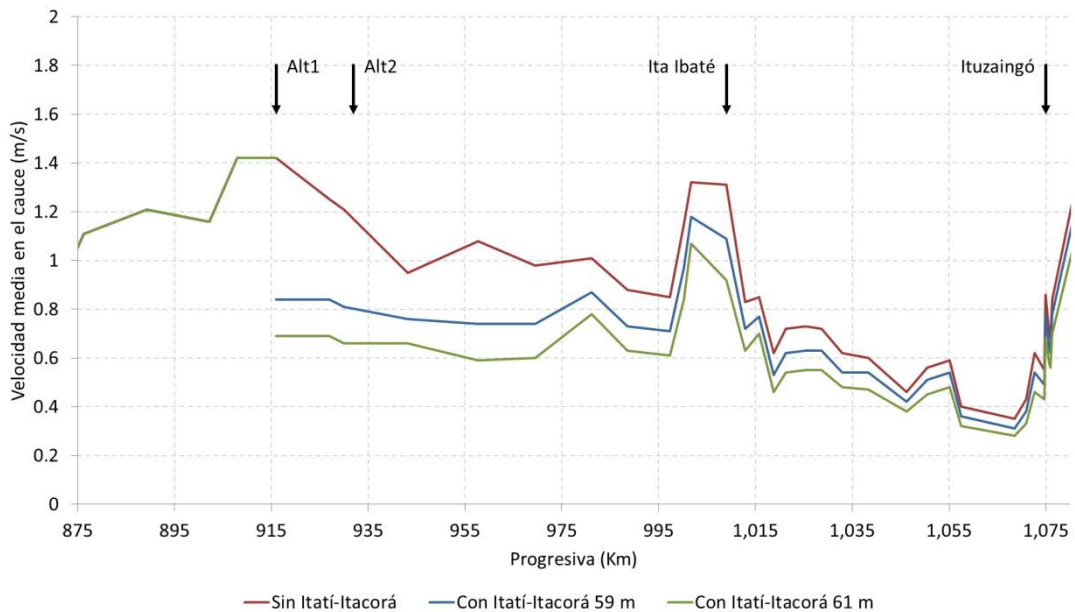


Figura 3.3. Perfil de velocidad para un caudal de 45.000 m³/s en distintos escenarios de proyecto.

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 3.4** se presenta el perfil de tirantes para el caudal medio, y en la **Figura 3.5** 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 3.6** 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 3.7** 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 en el sentido de una navegación más segura.

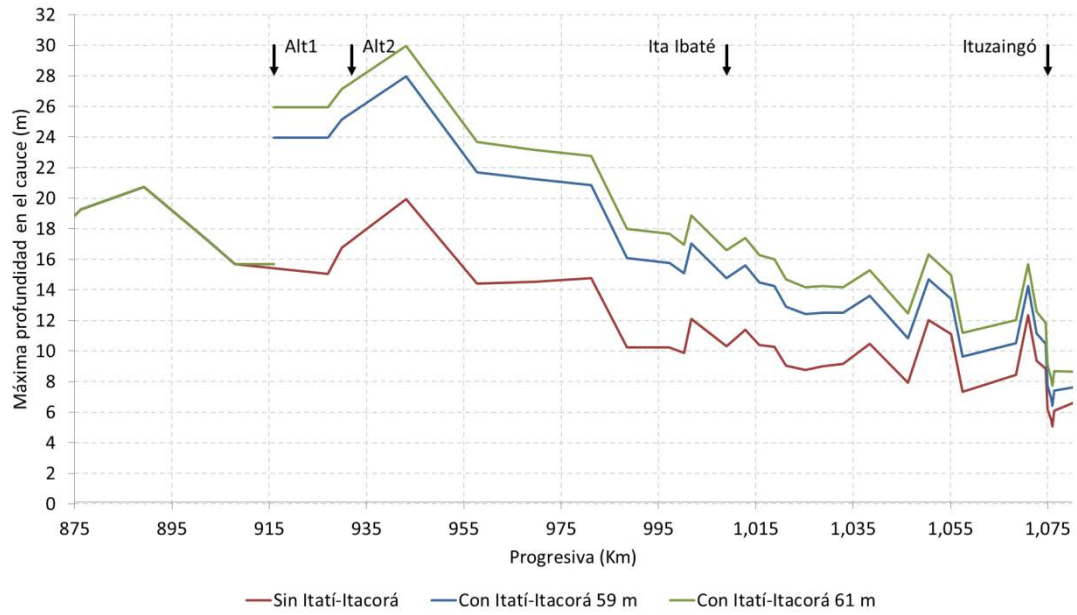


Figura 3.4. Perfil de tirantes para un caudal de $14.735 \text{ m}^3/\text{s}$ en distintos escenarios de proyecto.

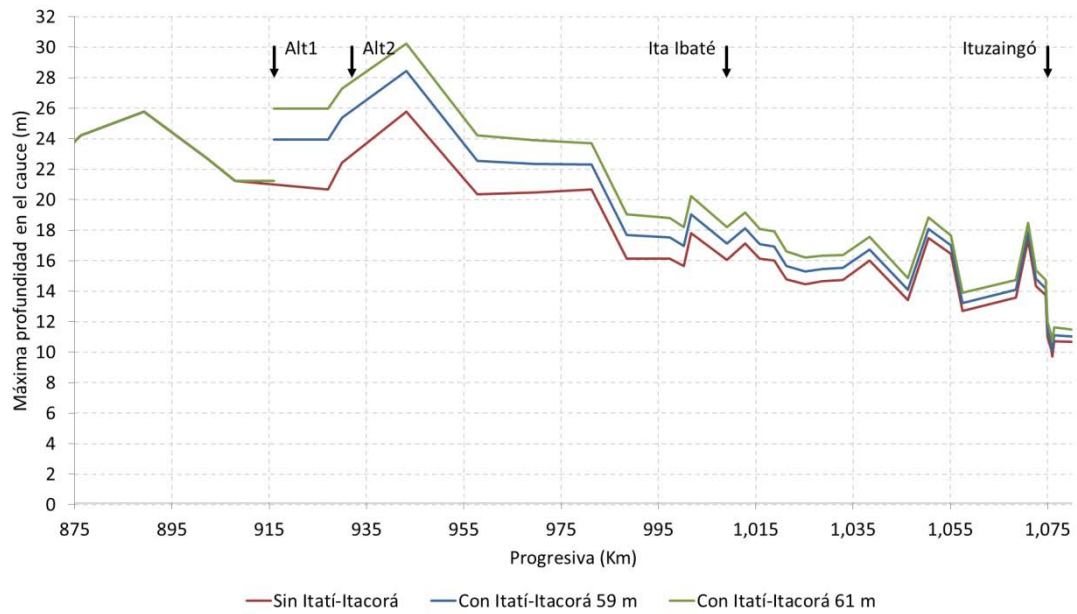


Figura 3.5. Perfil de tirantes para un caudal de $45.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en distintos escenarios de proyecto.

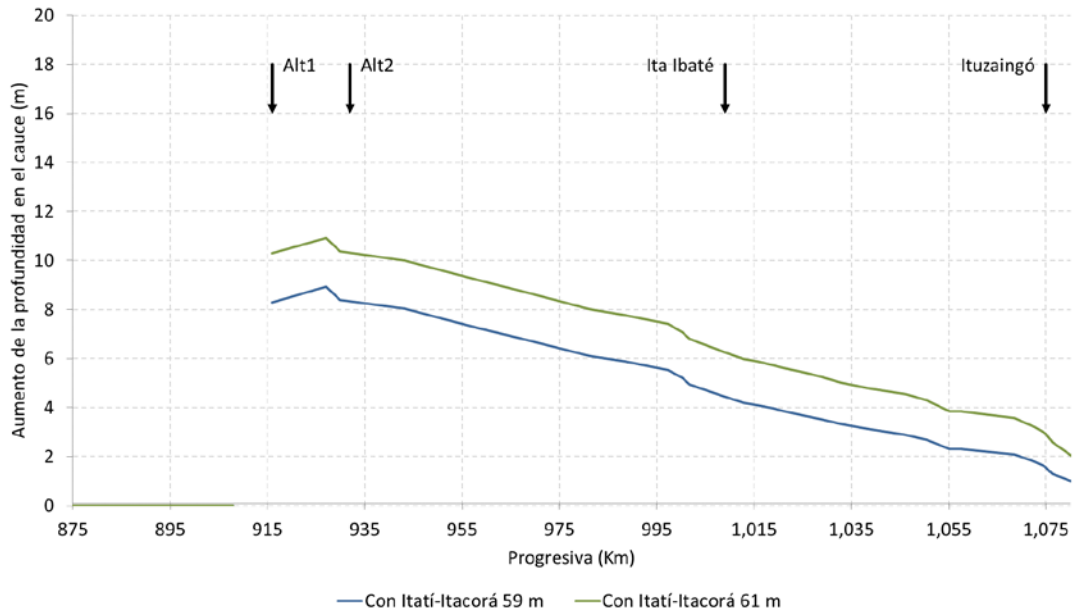


Figura 3.6. Aumento de profundidad respecto de la situación actual para un caudal de 14.735 m³/s en distintos escenarios de proyecto.

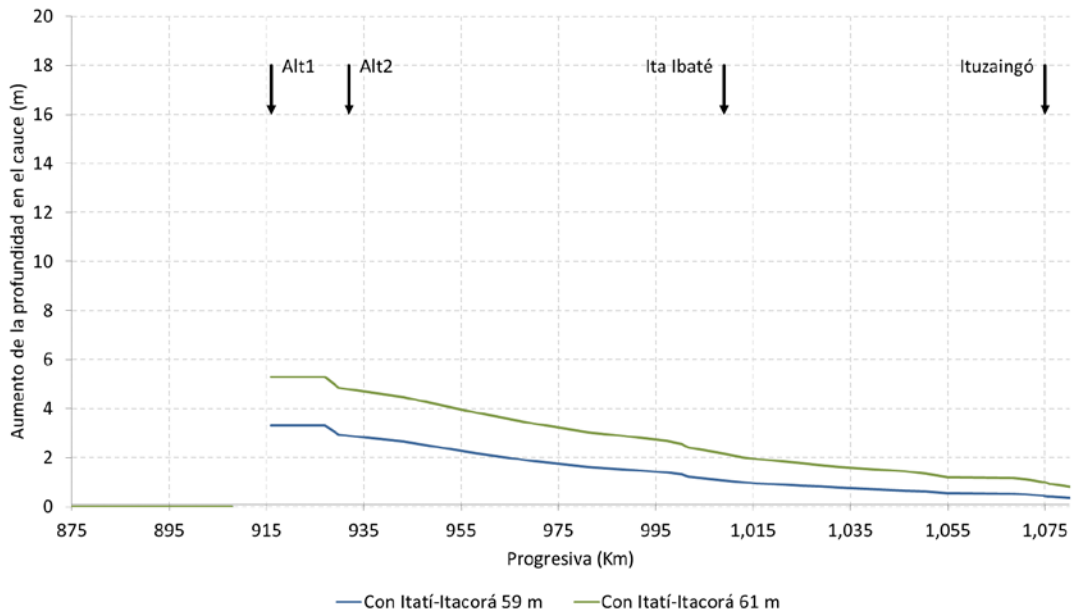


Figura 3.7. Aumento de profundidad respecto de la situación actual para un caudal de 45.000 m³/s en distintos escenarios de proyecto.

3.3 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 3.8** se observan los hidrogramas horarios de turbinado resultantes para ambas centrales, con el caudal medio diario de ensayo de 10.500 m³/s.

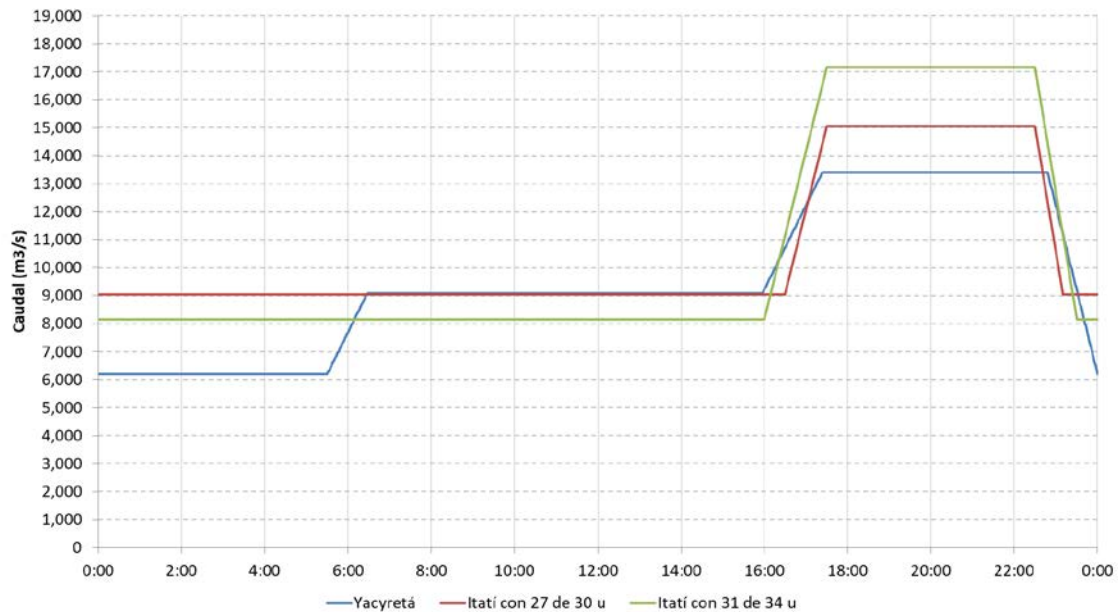
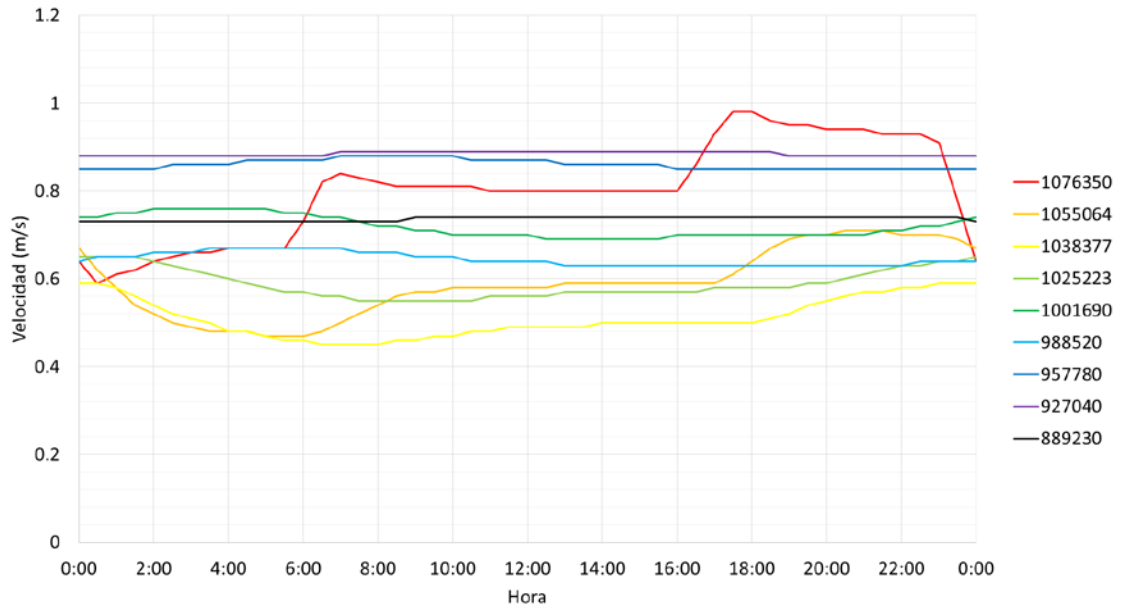


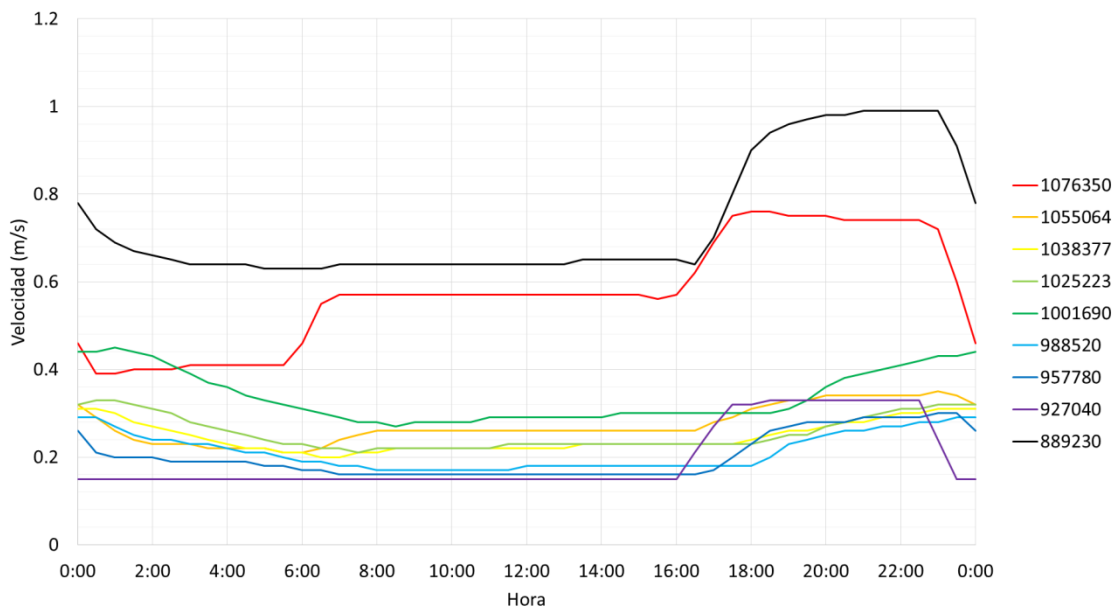
Figura 3.8. Hidrogramas de turbinado de Yacyretá e Itatí Itacorá para un caudal medio diario de $10.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

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.

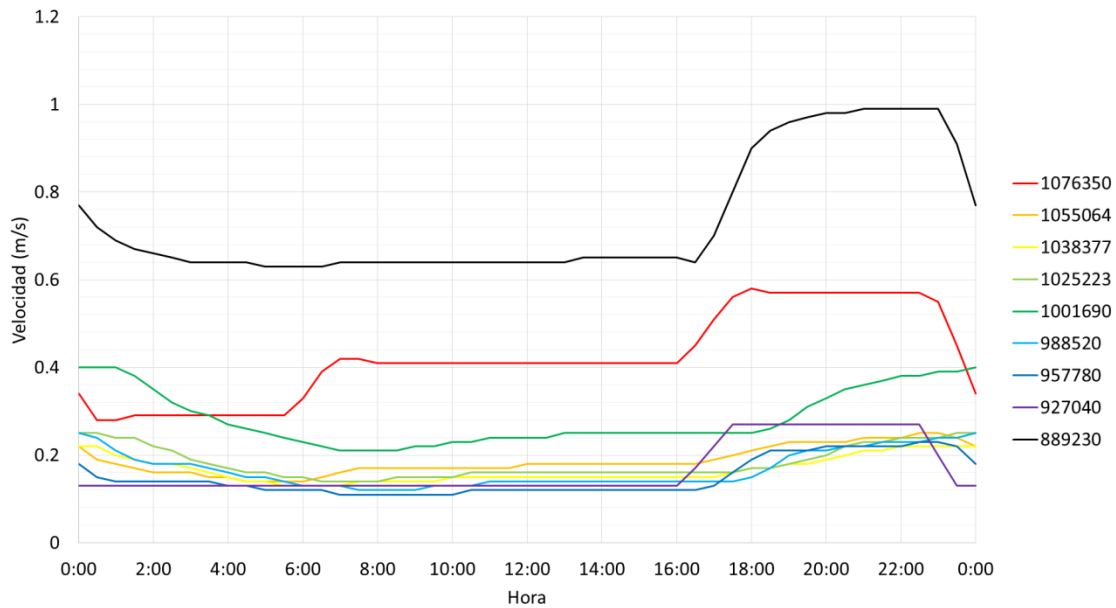
Para cada uno de estos escenarios se graficó la velocidad horaria obtenida en 8 secciones aproximadamente equiespaciadas entre Yacyretá e Itatí-Itacorá (entre progresivas 927 y 1076 km), así como una sección aguas abajo de este último cierre (progresiva 889 km). En la **Figura 3.9** se presentan las 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 59m, con ambas centrales empuntadas



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

Figura 3.9. Modulación horaria de las velocidades en distintas secciones producidas por el empuntado de las centrales, para un caudal medio diario de $10.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Este efecto se aprecia mejor en la **Figura 3.10**, 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 3.11** se presentan las envolventes de los caudales instantáneos (mínimo y máximo) para un caudal medio de $10.500 \text{ m}^3/\text{s}$ 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.

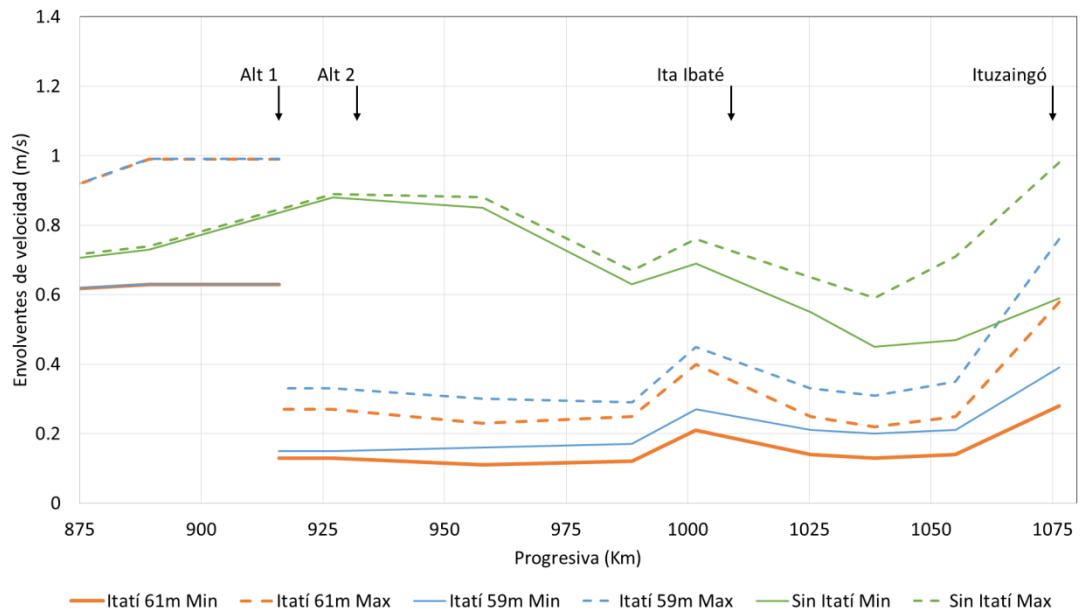


Figura 3.10. Envoltentes de la velocidad en distintas secciones producidas por el empuntado de Yacyretá e Itatí-Itacorá para un caudal medio diario de $10.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

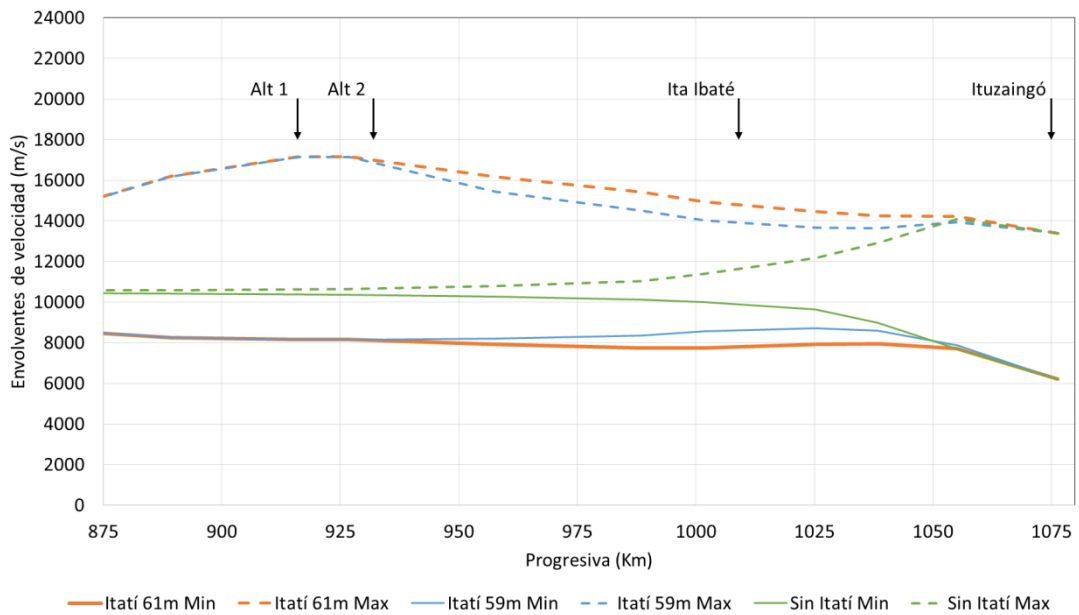


Figura 3.11. Envoltentes del caudal en distintas secciones producidas por el empuntado de Yacyretá e Itatí-Itacorá para un caudal medio diario de $10.500 \text{ m}^3/\text{s}$.

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 turбина 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 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 turбина 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.

4 EROSIÓN

4.1 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 $14.735 \text{ m}^3/\text{s}$, y representativo de crecidas extraordinarias, de $45.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

La **Figura 4.1** y la **Figura 4.2** 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 $2/8 \text{ Pa}$ hasta $0,3/1,4 \text{ Pa}$ con el embalse a cota 59 m, y hasta $0,2/0,9 \text{ Pa}$ 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 $2/8 \text{ Pa}$ hasta $1,8/6,0 \text{ Pa}$ (reducción de entre 10% y 25%) y $1,5/4,7 \text{ Pa}$ (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.

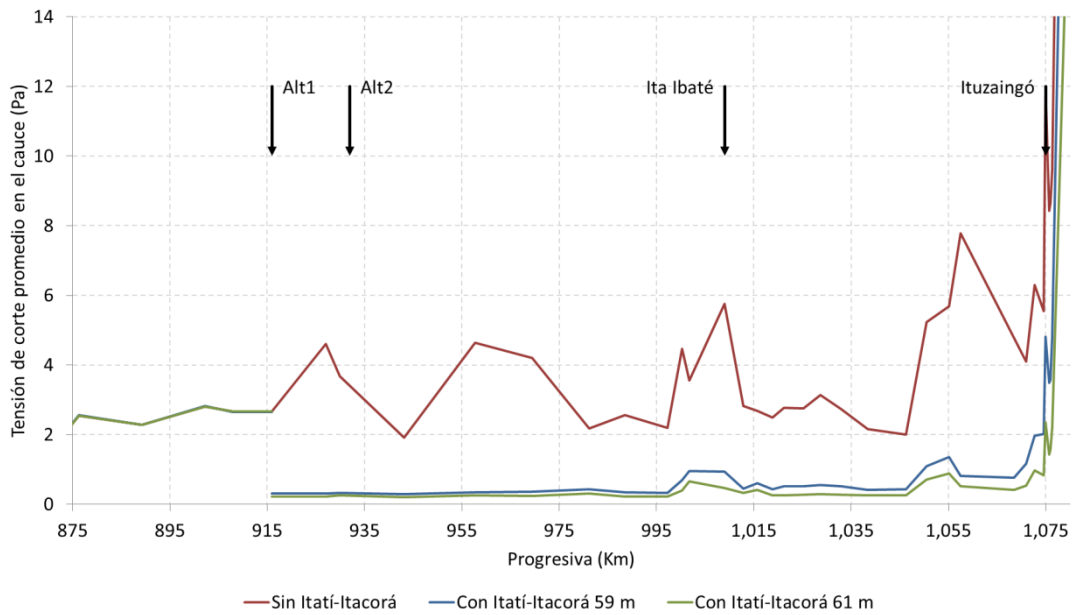


Figura 4.1. Perfil de tensión de corte para un caudal de $14.735 \text{ m}^3/\text{s}$ en distintos escenarios de proyecto.

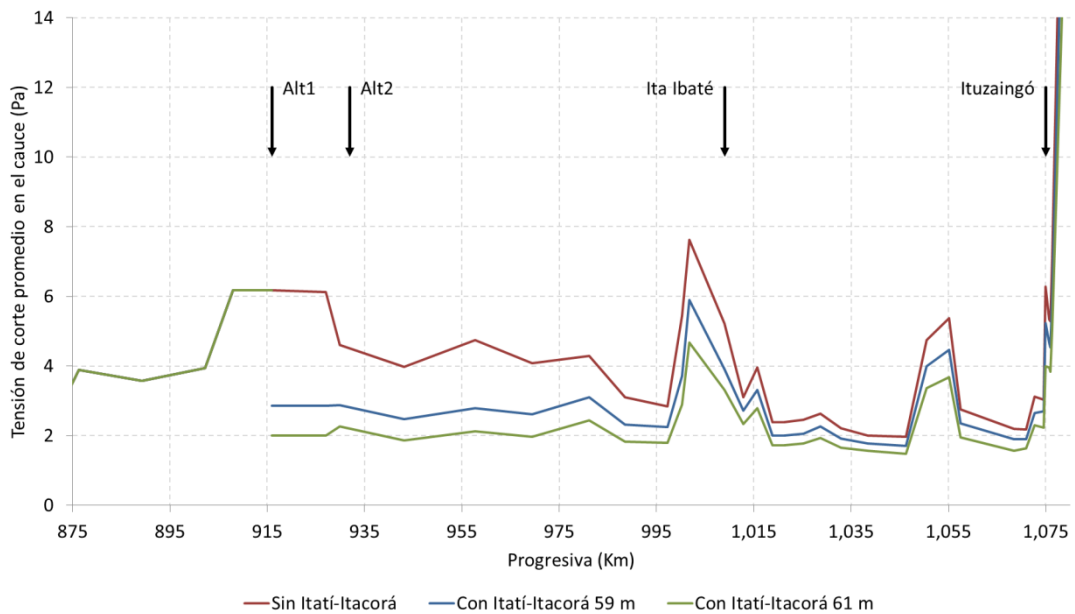


Figura 4.2. Perfil de tensión de corte para un caudal de $45.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en distintos escenarios de proyecto.

4.2 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 3.5**. 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 4.3** 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 4.2**). 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.

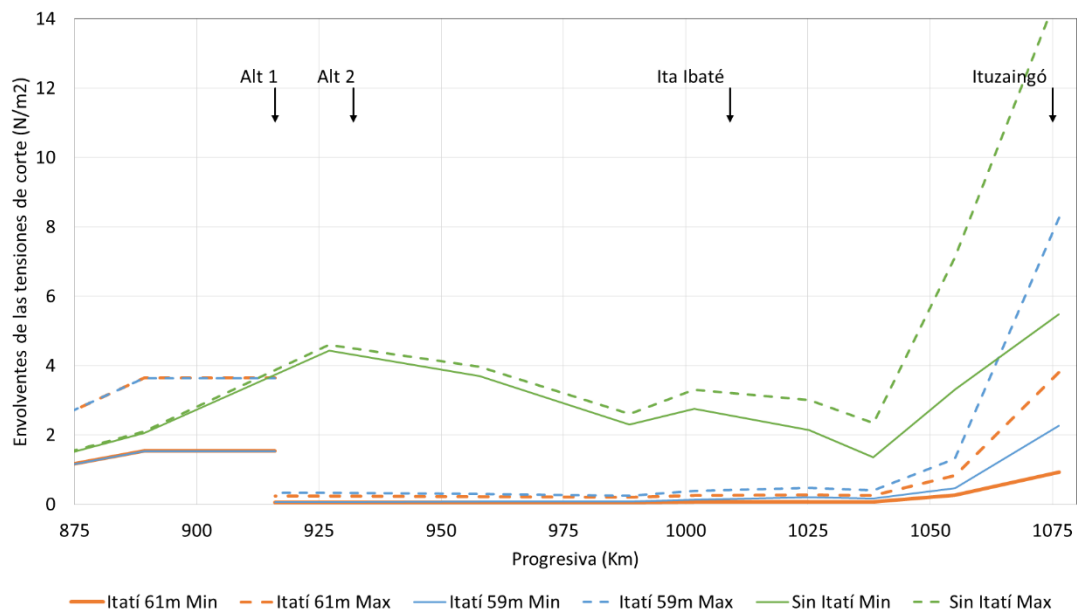


Figura 4.3. Envolventes de la tensión de corte en distintas secciones producidas por el empuntado de Yacyretá e Itatí-Itacorá para un caudal medio diario de 10.500 m³/s.

5 RED DE MONITOREO

5.1 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.

5.2 Red actual

La red actual cuenta con los hidrómetros cuya ubicación se indica en la **Figura 5.1** y la **Tabla 5.1**. Estos registran datos de nivel de agua de forma continua y son almacenados en sistemas de base de datos de acceso público. La **Tabla 5.2** presenta algunos detalles.



Figura 5.1. Ubicación de red hidrométrica en el área de influencia.

Tabla 5.1. 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 5.2. 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.

5.3 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 5.2** se indica la red de hidrómetros propuesta en orden de prioridad. Algunos detalles se muestran en la **Figura 5.3**. A continuación se explica la funcionalidad de cada uno.

- Hidrómetros ‘Alternativa 1’ (**Figura 5.3a**) y ‘Alternativa 2’ (**Figura 5.3b**): 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.

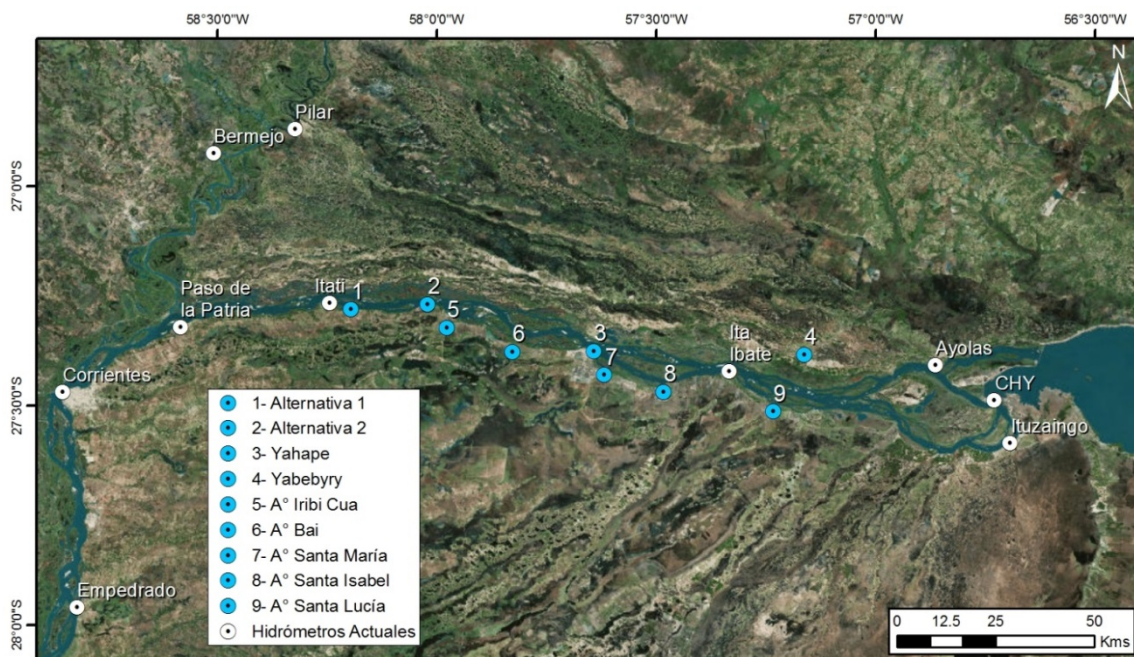


Figura 5.2. Ubicación de hidrómetros propuestos.

- Hidrómetro ‘Yabebyry’ (**Figura 5.3c**), sobre el río homónimo de margen paraguaya, a la altura de la ciudad homónima ($57^{\circ}9'48''\text{O}$ - $27^{\circ}23'2''\text{S}$). Este registro permitiría cuantificar este aporte de margen derecha al embalse.

- Hidrómetro ‘Iribí Cuá’ (**Figura 5.3d**), 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 5.3e**), 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 5.3f**), 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 5.3g**), 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.

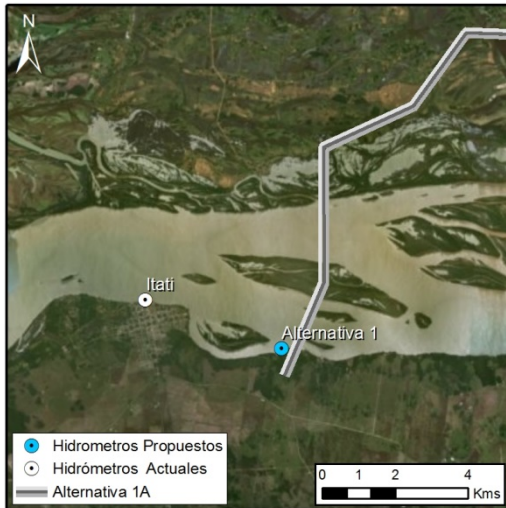
Tabla 5.3. Ubicación y Fuente de las estaciones hidrométricas propuestas.

#	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

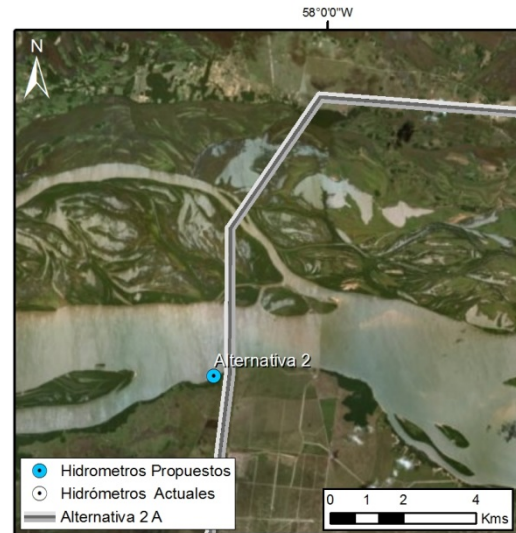
En todos los casos se recomienda sensores automáticos que tengan la capacidad de almacenar la información y si es posible transmitir en tiempo real.

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).

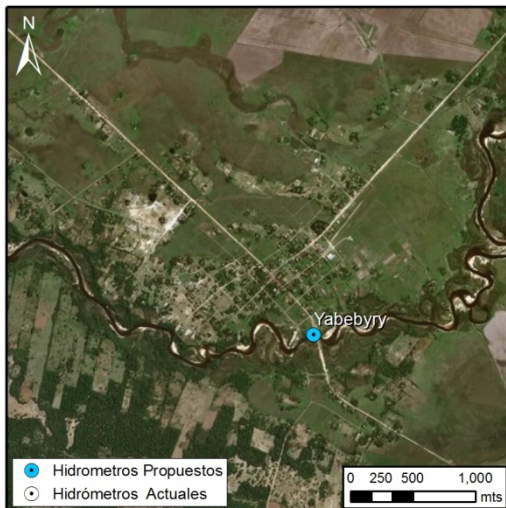
Las estaciones ‘Alternativa 1’ y ‘Alternativa 2’ sirven en una primera etapa para la elaboración de las curvas de restitución de ambas presas. Se deben realizar aforos de forma continuada para poder establecer estas curvas. El sensor de la presa que se termine construyendo tendrá la función de establecer 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.



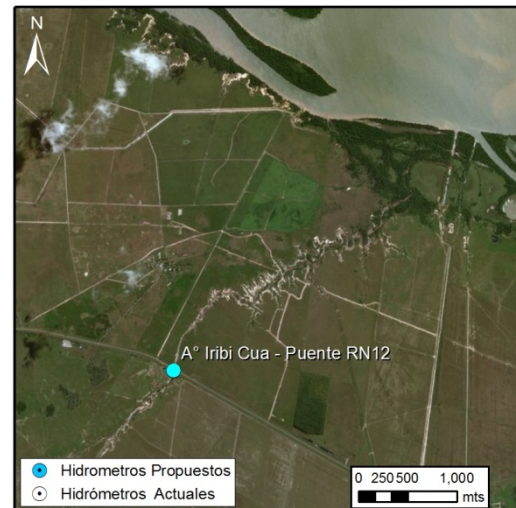
a) ‘Alternativa 1’



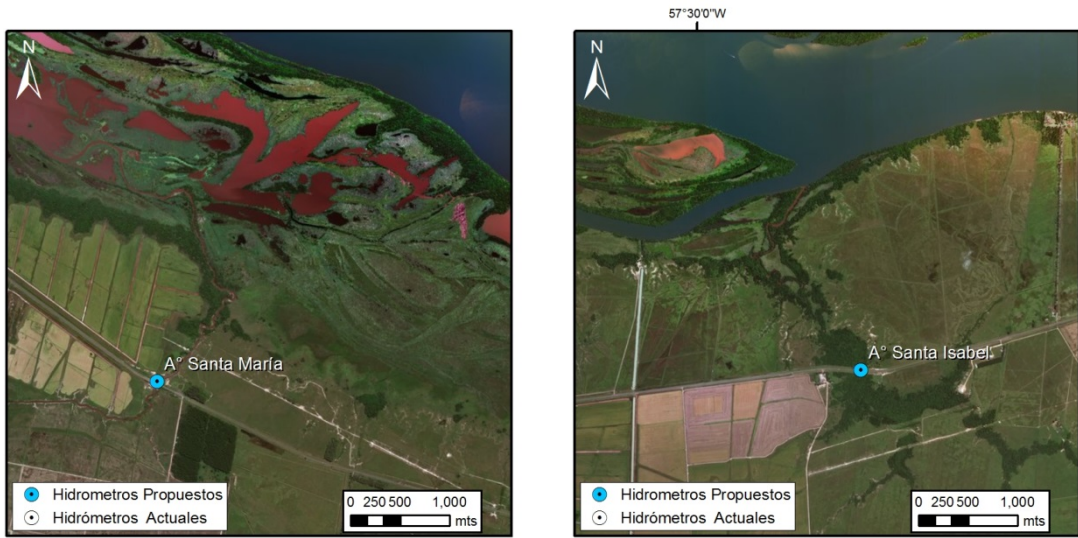
b) ‘Alternativa 2’



c) ‘Yahapé’

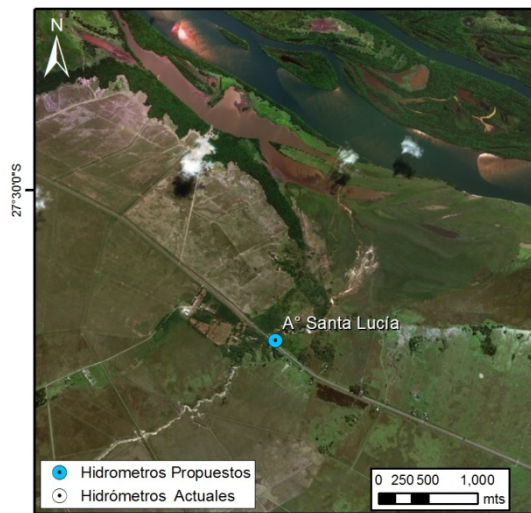


d) ‘Iribí Cuá’



e) 'Santa María'

f) 'Santa Isabel'



g) 'Santa Lucía'

Figura 5.3. Detalle de ubicación de hidrómetros propuestos.

6 CONCLUSIONES

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

- 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.
- 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 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 turbinaba el caudal pico.

- 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.
- 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.

7 REFERENCIAS

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

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.

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

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

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