

CARACTERIZACIÓN DE NIVELES MÍNIMOS EN LA VÍA NAVEGABLE DEL RÍO PARANÁ

Juan Borús y Martín Sabarots Gerbec

Instituto Nacional del Agua, AU Ezeiza – Cañuelas, tramo J. Newbery km. 1,62 Ezeiza, BA, Argentina.

Conmutador (011) 4480:4500; jborus@ina.gov.ar – msabger@gmail.com

RESUMEN

Las situaciones de aguas bajas en el río Paraná tienen un impacto económico que amerita su análisis recurrente. Los años secos registrados en el período posterior a 1999 se caracterizaron por niveles fluviales persistentemente bajos, con la consiguiente dificultad para la navegación y la reducción de los calados operativos. Por lo tanto, existe una necesidad creciente de cuantificar los riesgos para la navegación, así como en lo que hace a otros usos del recurso.

La gradual entrada en operación de los aprovechamientos hidroeléctricos emplazados en la alta cuenca brasileña fue modificando la respuesta estacional de la misma. En una forma más gradual, pero también irreversible, se fue corriendo la frontera agrícola en aquella región hacia el oeste, con la consiguiente modificación de la respuesta hidrológica de los suelos. El efecto más significativo es la moderación de los caudales y niveles mínimos en correspondencia con el cordón portuario Santa Fe – San Pedro.

Por estas razones, es necesario discriminar períodos en el análisis y aproximar una corrección de la serie histórica de registros de caudal, de manera de simular el comportamiento de la cuenca como si hubiese estado alterada siempre. Se considera el efecto antropogénico siguiendo la metodología presentada oportunamente por Bronstein (2000).

Se presenta un análisis de las series temporales de nivel y caudal en estaciones del tramo mencionado, considerando tres períodos: 1901 / 1960 (inalterado), 1961 / 1982 (gradualmente alterado) y 1983 / 2014 (definitivamente alterado). Complementariamente, se realiza el análisis discriminado por estación del año. La información hidrométrica se integra previamente en períodos de 7, 15 y 30 días, buscando caracterizar la permanencia de valores bajos.

Como producto del análisis, se presentan las curvas de duración de caudales y niveles mínimos, así como los ajustes de recurrencias de caudales mínimos en la vía navegable. En ambos casos, el análisis se realiza sobre las correspondientes series totales convertidas considerando el efecto antropogénico mencionado.

Se dispone de series corregidas de caudales que consideran la alteración de la alta cuenca a causa de las presas de embalse, sobre las que se estiman parámetros estadísticos útiles para la navegación y el diseño de obras portuarias.

Palabras clave: Río Paraná, bajantes, embalses, navegación, recurrencias.

INTRODUCCION

Las cuencas de los ríos Paraná y Paraguay son motivo de permanente monitoreo para actualizar su condición hidrológica y realizar pronósticos hidrométricos como apoyo a las diversas actividades que se realizan en la vía fluvial. La más significativa sin dudas es la navegación fluvial comercial en gran escala, actividad supeditada a la disponibilidad de profundidades suficientes para los buques de gran calado.

La observación de las series temporales hidrométricas en todo el tramo argentino del río es muy elocuente de los cambios que se han ido registrando en las altas cuencas, resultando en niveles mínimos significativamente más altos en los últimos años. Las Tablas 1.- y 2.- resumen esta observación considerando las secciones de mayor referencia de altura y caudal en el tramo.

Tabla 1. Caudal en Corrientes (metros cúbicos por segundo)

Estación	1901 / 1960		1961 / 1982		1983 / 2014	
	Medios	Mínimos	Medios	Mínimos	Medios	Mínimos
Verano	18700	15900	20900	17500	20300	17200
Otoño	16800	14400	16400	14100	20200	17400
Invierno	12200	10300	13300	11600	17500	15300
Primavera	13300	11000	15600	12800	18100	15500

Tabla 2. Alturas en Rosario (metros en la escala local)

Estación	1901 / 1960		1961 / 1982		1983 / 2014	
	Medios	Mínimos	Medios	Mínimos	Medios	Mínimos
Verano	2,89	2,47	3,36	2,97	3,54	3,22
Otoño	3,15	2,78	3,19	2,82	3,83	3,56
Invierno	1,98	1,50	2,14	1,74	3,33	3,01
Primavera	1,87	1,38	2,33	1,84	3,26	2,90

Los cambios en los usos del suelo afectan los valores medios por una mayor escorrentía, efecto que no distingue época del año. Las tablas indican aumentos en las cuatro estaciones destacándose los observados en otoño, como los más relevantes por sus implicancias en la navegación.

Es necesario, por lo tanto, asumir estos cambios y considerarlos en las tomas de decisión tanto en el diseño de las obras portuarias como la operación portuaria y la navegación misma.

OBJETIVOS

Presentar las conclusiones del análisis comparativo y establecer la base conceptual para el monitoreo permanente de apoyo a la navegación, con vistas a posibles años de aguas muy bajas en los que la atención se concentre en el pronóstico de niveles mínimos. La conformación de series de datos observados y corregidos, más la disponibilidad de modelos ajustados al escenario fluvial permite fortalecer el seguimiento para ofrecer un servicio eficiente.

ANTECEDENTES

El monitoreo diario de la situación hidrométrica del río Paraná se efectúa desde febrero de 1983 en forma sistemática, poniendo énfasis en los eventos extremos. En los 32 años de actividad del Sistema de Alerta de la Cuenca del Plata en territorio argentino se afrontaron cambiantes situaciones, pasando de importantes crecidas a estiajes pronunciados, cada vez en forma más dinámica y acentuada. Estos cambios obligan a prepararse a eventos extremos significativos, que en caso de bajantes pronunciadas demandan la estimación de permanencia de estiajes por debajo de cotas umbral de referencia en cada sección del río.

La información anterior a la creación del Sistema fue siendo recopilada y consistida gradualmente. A medida que se sucedieron los eventos extremos la comparación con el pasado aportó información sobre los cambios que se iban sucediendo.

BASE ESTADÍSTICA

Considerando la escala ubicada en el puerto de Rosario desde 1884, de inevitable referencia permanente para la región, se realiza una descripción estadística de las lecturas en el período 1901 / 2014. El resultado se presenta en las siguientes tres tablas. La Tabla 3.- considera los tres umbrales principales de referencia y distingue en los tres períodos definidos en el resumen, mes por mes.

**Tabla 3. Permanencias Porcentuales de Alturas en Rosario
por encima de Alturas de Referencia (metros en la escala local)**

MES	1901 / 1960			1961 / 1982			1983 / 2014		
	2,00	2,50	3,00	2,00	2,50	3,00	2,00	2,50	3,00
Enero	66	50	36	77	57	48	83	74	54
Febrero	85	69	53	93	85	73	95	81	72
Marzo	89	82	68	98	91	84	97	89	76
Abril	92	84	71	93	88	81	99	91	86
Mayo	83	69	56	79	70	58	97	94	83
Junio	74	62	46	66	61	48	97	93	81
Julio	67	54	40	67	55	43	98	88	73
Agosto	45	32	24	60	36	28	92	82	65
Septiembre	31	16	8	44	34	26	87	62	43
Octubre	39	31	16	50	37	27	91	68	53
Noviembre	50	37	24	68	47	35	96	83	68
Diciembre	51	41	29	71	58	42	90	79	58

La Tabla 4.- presenta alturas correspondientes al percentil 20. Se aprecia el aumento significativo de valores especialmente en otoño, del orden de 4 ft. Este aumento debe ser considerado como suma de efectos, considerando también una mayor pluviosidad, con años muy húmedos.

**Tabla 4. Alturas en Rosario
Superadas el 80% de los Registros Diarios (metros en la escala local)**

MES	1901 / 1960			1961 / 1982			1983 / 2014		
	7 días	15 días	30 días	7 días	15 días	30 días	7 días	15 días	30 días
Verano	1,82	1,64	1,28	2,25	2,11	2,04	2,42	2,27	2,18
Otoño	2,00	1,84	1,65	1,81	1,60	1,40	3,06	2,95	2,76
Invierno	0,47	0,37	0,13	0,57	0,49	0,20	2,28	2,19	2,09
Primavera	0,38	0,18	0,04	0,80	0,63	0,37	2,33	2,22	2,02

La Tabla 5.- considera la estadística de alturas mínimas móviles en agrupaciones de 7, 15 y 30 días. Nuevamente la consideración de las cuatro estaciones destaca al otoño en el que se observan valores de altura convenientes para la navegación.

Tabla 5. Valores Medios de las Alturas Mínimas en Rosario en 7, 15 y 30 Días (metros en la escala local)

MES	1901 / 1960			1961 / 1982			1983 / 2014		
	7 días	15 días	30 días	7 días	15 días	30 días	7 días	15 días	30 días
Verano	2,47	2,58	2,70	2,35	2,81	3,28	3,26	3,23	3,19
Otoño	3,28	3,09	2,90	3,78	3,40	3,02	3,87	3,75	3,64
Invierno	2,34	1,82	1,30	2,85	2,29	1,74	3,37	3,14	2,92
Primavera	1,48	1,34	1,21	1,79	1,83	1,88	3,04	2,90	2,76

METODOLOGIA

Criterio de Análisis

Se realizará un análisis con caudales de manera de considerar la dinámica del escurrimiento. Para ello se consideran las secciones de frecuente aforo correspondientes a la Red Hidrológica Nacional. La sección ubicada en Timbúes, agua arriba de Rosario, resulta conveniente por la disponibilidad de aforos, con la debida limitación por la modificación de la traza del río desde la cabecera del Delta. El énfasis estará puesto en el tramo agua abajo de la sección Paraná - Santa Fe, primero en caudales y luego en alturas.

Modelo Hidrodinámico

Se cuenta con un modelo hidrodinámico unidimensional desarrollado en red de canales del Delta Medio, desde el eje Paraná-Santa Fe hasta la desembocadura en el Río de la Plata (Sabarots Gerbec, 2014). La Figura 1.- detalla la región de estudio.

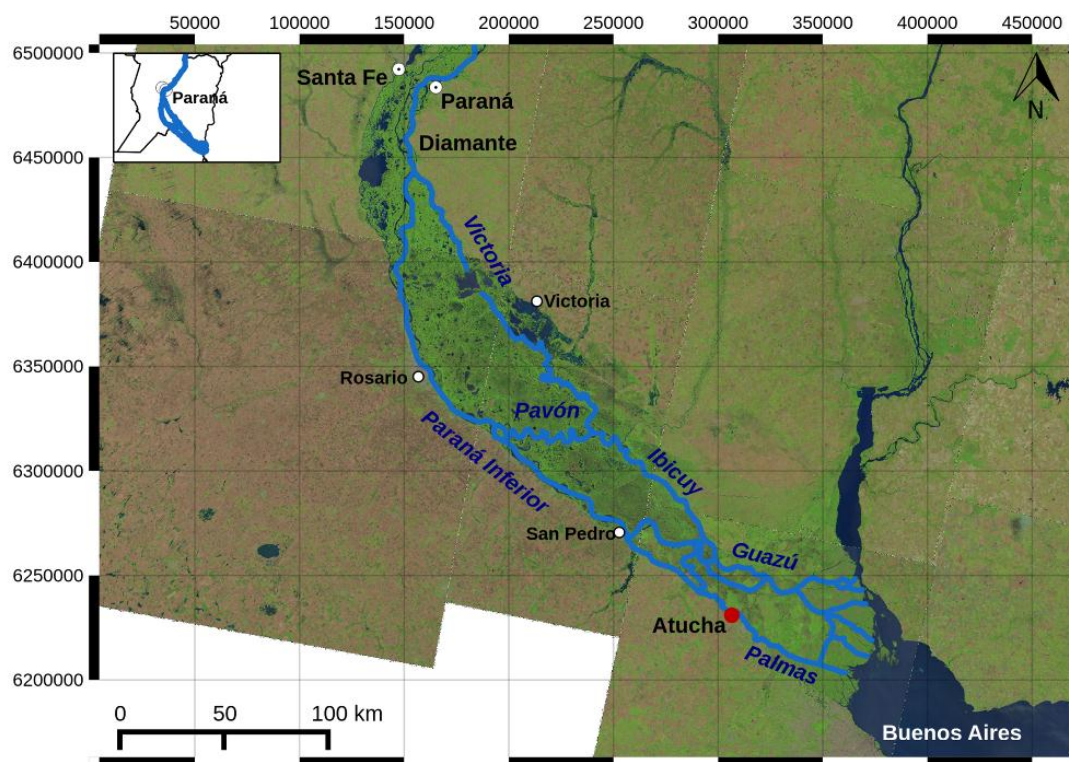


Figura 1. Mapa de Ubicación de la Región en Estudio

Forzantes del sistema

Para el forzante aguas arriba del modelo se utilizaron niveles en Paraná. Dado que una condición de borde de niveles aguas arriba puede conllevar a un incorrecto cómputo de caudales ingresantes al sistema, se realizó un análisis previo de la curva Altura-Caudal en el eje Paraná-Santa Fe. En la sección del Paraná a la altura del Túnel Subfluvial se cuenta con datos de aforos desde 1982 hasta la actualidad. Ahora bien, para computar correctamente el caudal del Paraná, es necesario tener en cuenta el escurrimiento del río Colastiné y de la descarga de la laguna Setúbal. En la Figura 2.-, se observa las tres estaciones de aforo en el Eje Paraná-Santa Fe, mientras que aguas arriba se encuentran las estaciones de Leyes (el arroyo desemboca luego en la Laguna Setúbal y Chapetón. Finalmente, aguas abajo se observa la estación de Puerto Timbúes que resulta de interés para los análisis que se muestran más adelante.

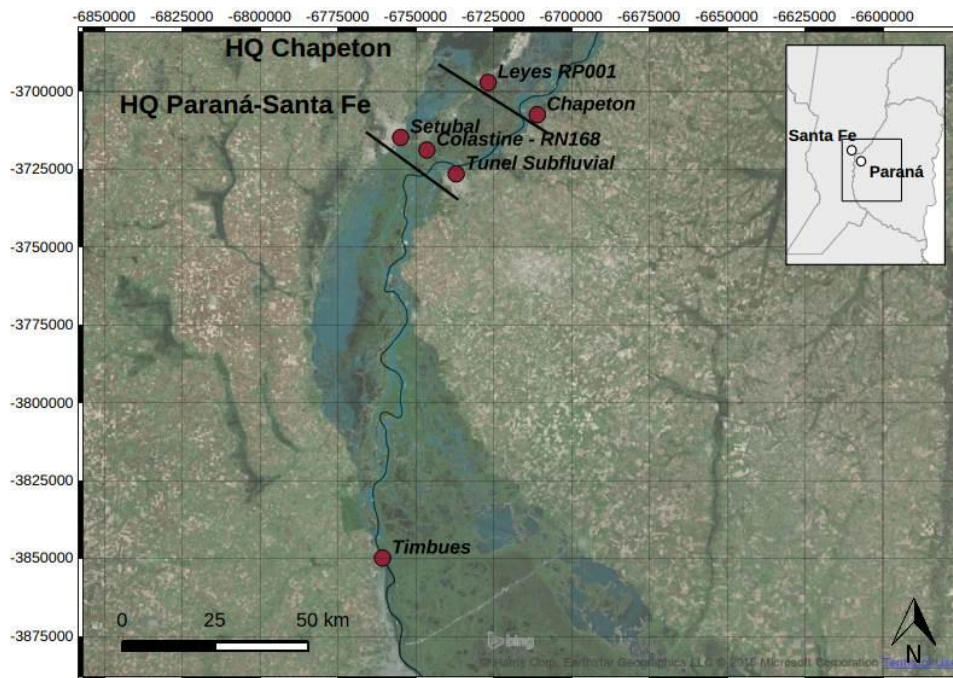


Figura 2. Mapa de Ubicación de las Secciones de Aforo

Para corroborar que el caudal que surge de la suma de Laguna Setúbal, Colastiné y Paraná (Sección Túnel Subfluvial) fueran representativos, se los comparó con los de la sección Chapetón-Leyes y posteriormente con los aforos en Puerto Timbúes. En el caso de estos últimos se tuvo en cuenta que no contemplan el escurrimiento que se da en la rama del brazo Diamante - Victoria y cursos adyacentes.

En la Figura 3.- se presentan las series de valores aforados para las tres secciones en consideración. Se observa como las series de Paraná-Santa Fe y Chapetón son casi coincidentes, mientras que la de Puerto Timbúes presenta la mayor diferencia con las anteriores en la crecida de 1998, donde lo que no es conducido por el Paraná es significativo desborde hacia la rama Victoria.

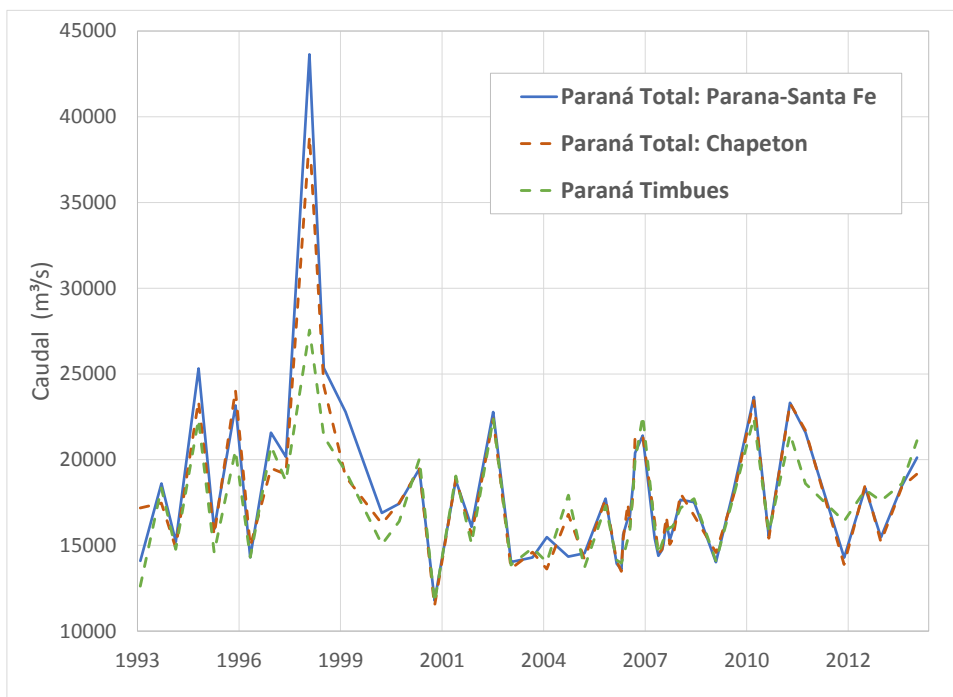


Figura 3. Series de Caudales Aforados

El análisis anterior, permite llegar a una curva Altura-Caudal (HQ) en la sección Paraná-Santa Fe, la cual es correctamente representada por el modelo hidrodinámico, lo que implica directamente que los caudales ingresantes al sistema son los correctos. En la Figura 4.-, se presenta la curva HQ del Túnel Subfluvial y la reconstruida para el Eje Paraná-Santa Fe.

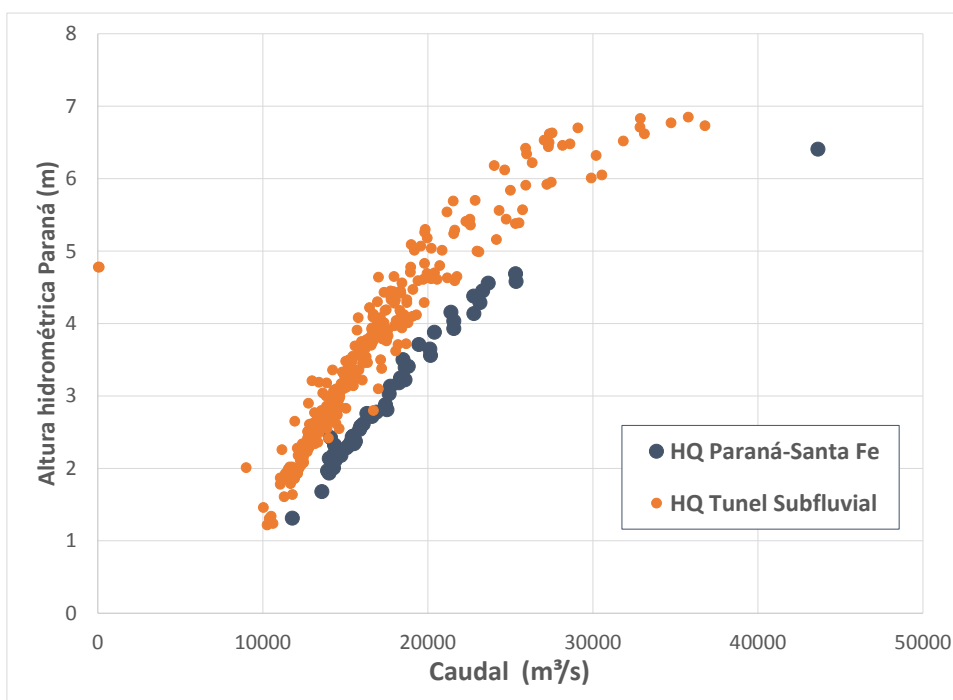


Figura 4. Nubes de Puntos de Aforo en Ambas Secciones

La principal ventaja de forzar el sistema de esta manera es que evitando realizar un ajuste de una relación unívoca entre Altura y Caudal, se conserva la posibilidad de representar la histéresis

del sistema, ya que la validación entre la curva HQ simulada y la curva HQ reconstruida para el Eje Paraná-Santa Fe, es una validación entre nubes de puntos.

Para la condición de borde de aguas abajo se tomó nivel medio en el Río de la Plata, dicha condición de borde no tiene una influencia significativa en la zona del dominio aguas arriba de Villa Constitución (Sabarots Gerbec, 2014).

Metodología

A partir de la serie de niveles registrados desde 1902 hasta la actualidad se realiza una correlación entre los valores extremos y medios anuales, para evaluar el efecto regulador de los embalses en la cuenca del Río Paraná (Bronstein, 2000). Las Figuras 5.- a 8.- presentan las curvas encontradas correspondientes a máximos anuales y a mínimos anuales analizadas en cada período. En ordenadas se indica siempre la cota IGN, calculada a partir de la cota de cero de escala de Paraná (IGN 9,565m). Resultan las expresiones que permiten realizar el ajuste hacia atrás.

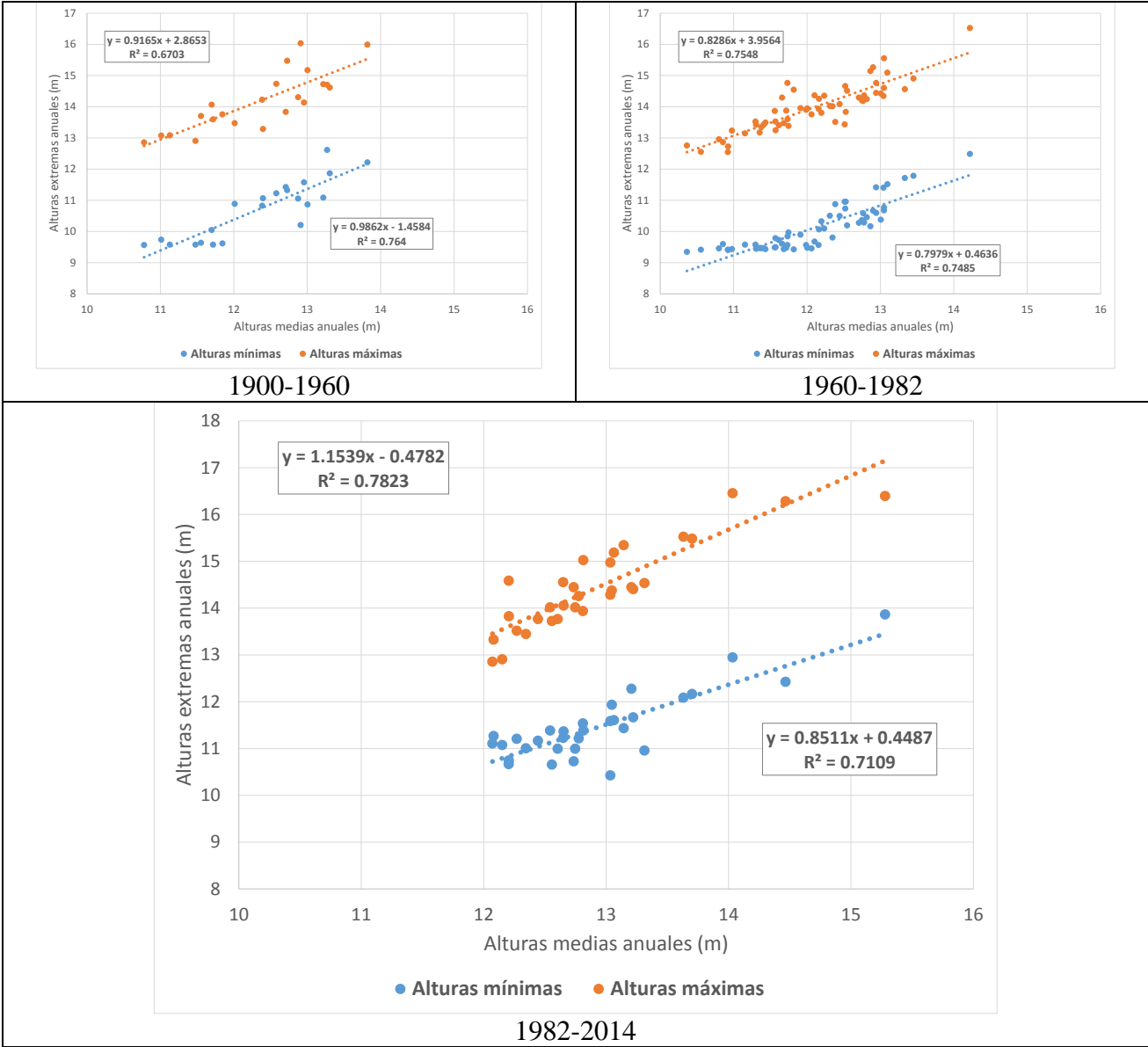


Figura 5. a 7. Ajustes de Alturas Extremas Anuales por Períodos

Una vez definidas las relaciones entre valores extremos y valores medios, se realiza una interpolación lineal para los valores intermedios del período *sin presas*. De esta forma se obtiene una serie de niveles en el Eje Paraná-Santa Fe, que representaría una condición con presas para una ventana de tiempo de más de 100 años.

VALIDACION

El modelo hidrodinámico fue validado tanto para niveles como para caudales, haciendo especial énfasis en estos últimos, aunque sólo se dispuso de tres estaciones de aforo claves:

1. Curva HQ en la sección Paraná-Santa Fe, permite validar la correcta entrada de caudales
2. Aforos en Puerto Timbúes, permite validar la partición de caudales entre la rama Paraná y la rama Victoria del modelo hidrodinámico
3. Aforos en Zárate, permiten validar la partición de caudales entre el Paraná de las Palmas y el Paraná Guazú

La Figura 10.- presenta la nube de puntos de aforo y la correspondiente a la corrida del modelo hidrodinámico. Se puede observar el adecuado ajuste.

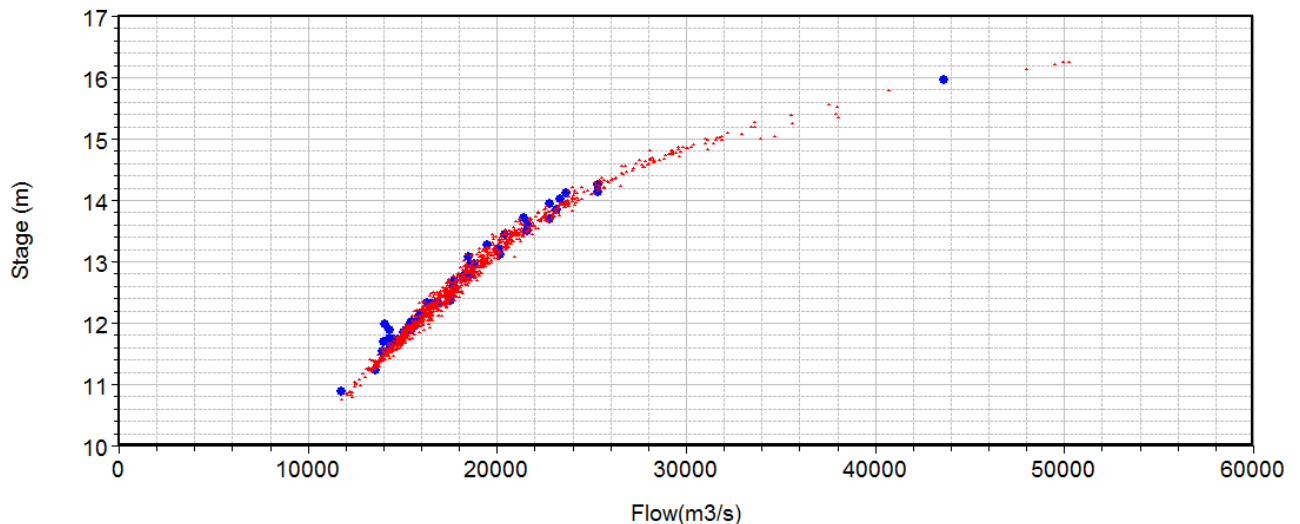


Figura 10. Validación de la Curva de Descarga H/Q en Paraná – Santa Fe

Las Figuras 11.- y 12.- muestran el buen ajuste del modelo hidrodinámico en Paraná – Santa Fe y en Zárate, respectivamente. Se puede ver que mantiene un buen acuerdo tanto en aguas altas como en aguas bajas.

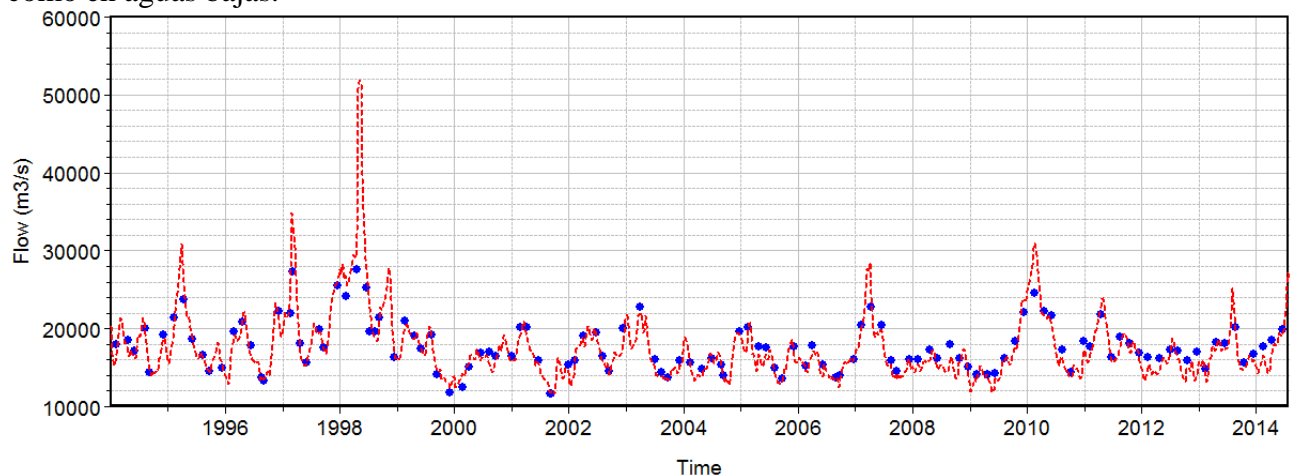


Figura 11. Comparación de Modelado con Aforos en Puerto Timbues

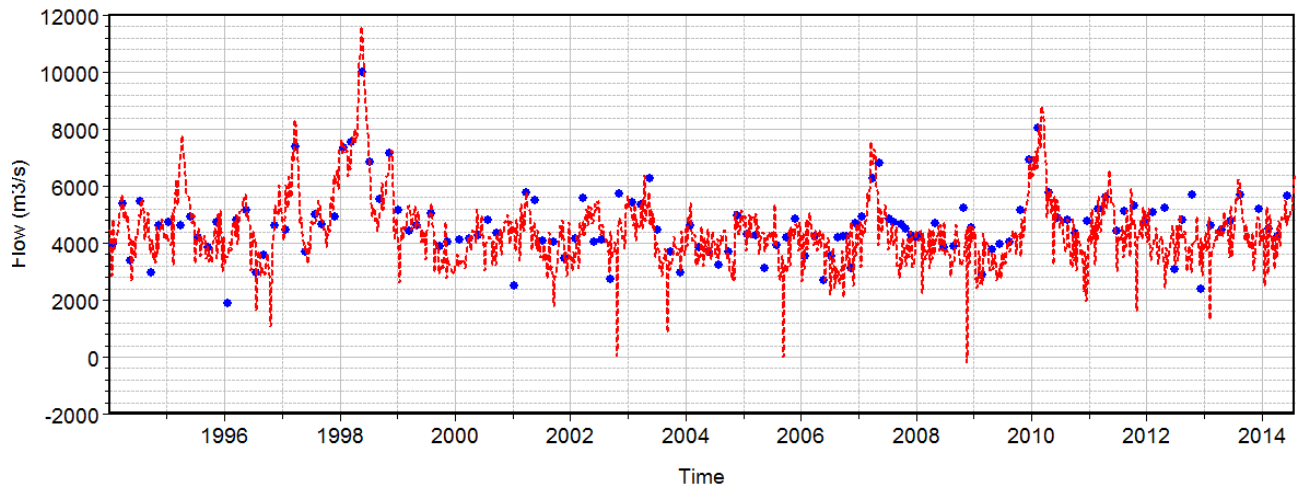


Figura 12. Comparación de Modelado con Aforos en Zárate

RESULTADOS

El buen ajuste observado y la representatividad de las curvas de descarga analizadas permiten aproximar caudales en Rosario apuntando principalmente a los extremos. La Figura 13.- muestra la curva de duración de caudales (Serie con presas) indicando el valor de $11.800\text{m}^3/\text{s}$ con una excedencia del 90%. Este valor resulta superior a los $11.200\text{m}^3/\text{s}$ que resultan de la Serie histórica para la misma excedencia.

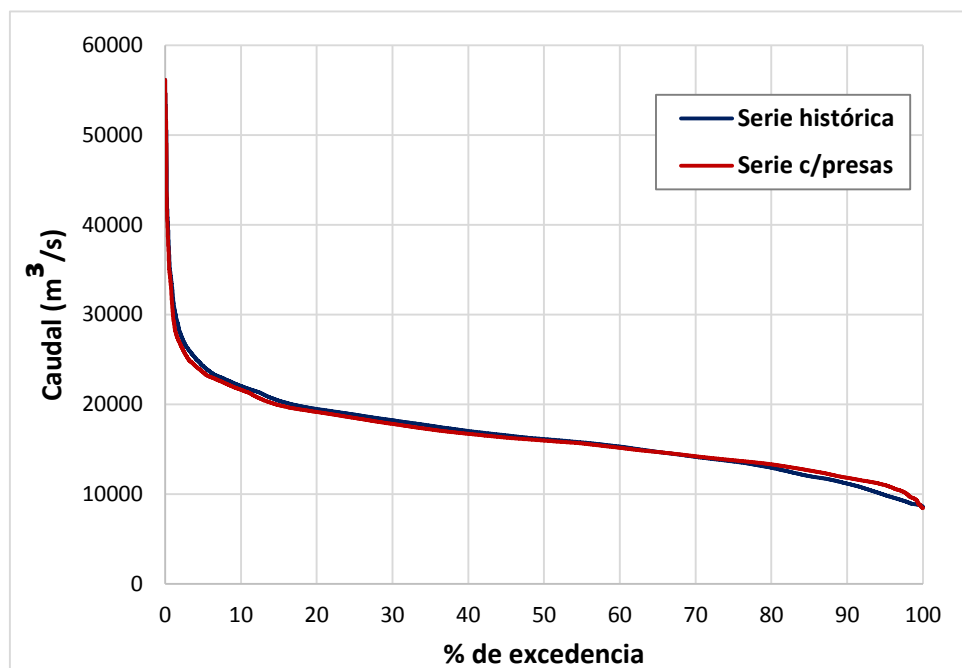


Figura 13. Curvas de Duración de Caudales en Rosario

La serie resultante de caudales entrantes a la cabecera del Delta presenta valores mínimos sustancialmente mayores que los registrados durante el período “sin presas”, por lo que su ajuste debe ser tenido en cuenta.

A partir de la serie de caudales resultantes en Rosario, teniendo en cuenta una situación con presas, se realizó un ajuste estadístico con dos distribuciones: GEV (Generalizad Extreme Values de 3 parámetros) y Gumbel. El resultado se presenta en la Figura 12 y en la Tabla 6. Cabe destacar que el mejor ajuste fue logrado con la distribución GEV.

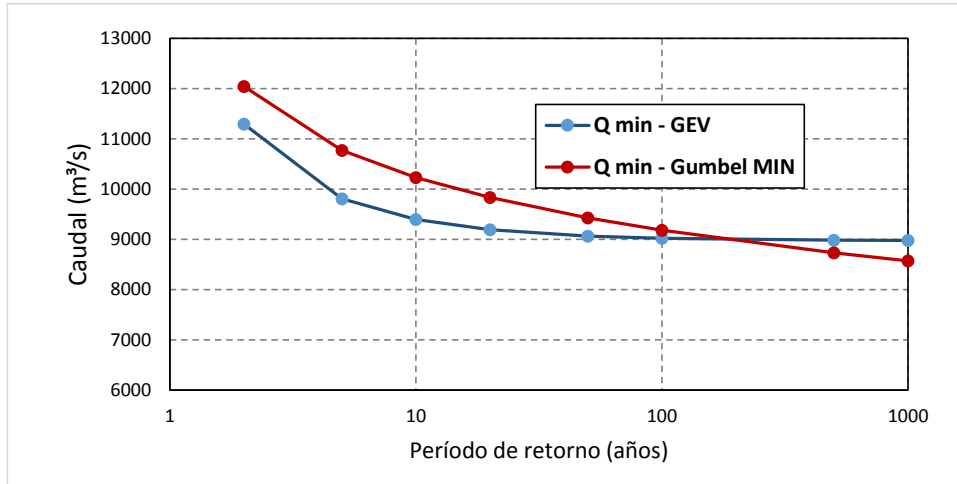


Figura 13. Caudales mínimos extremos para distintos períodos de retorno

Tabla 6. Ajuste de Recurrencias de Caudales Mínimos en Rosario

Recurrencia	GEV	Gumbel MIN
2	12214	12041
5	10700	10770
10	10034	10229
20	9569	9832
50	9145	9429
100	8922	9183

CONCLUSIÓN

La alteración producida por las obras hidráulicas emplazadas en las altas cuencas del río Paraná debe ser tenida en cuenta tanto a la hora de pronosticar niveles hidrométricos como servicio a los distintos usos del recurso fluvial como a la hora de proyectar obras costeras o planificar la navegación de gran porte.

Se realizó un análisis sobre la curva Altura-Caudal en el Eje Paraná-Santa Fe de modo de tener en cuenta el caudal total del río Paraná asociado a las lecturas de escala hidrométrica de Paraná. Esto permite considerar el efecto de la histéresis de caudales ingresantes al sistema, lo cual se refleja en un modelo hidrodinámico satisfactoriamente validado.

Se presentan los resultados de la transformación de la serie histórica de caudales ingresantes al Delta del Paraná contemplando la presencia de presas (condición actual). Los efectos resultantes muestran una sensibilidad a considerar la transformación con presas de un 5% para el caudal de excedencia del 90%, que para condiciones de estiaje resultan significativos.

Finalmente se presenta el ajuste estadístico con dos distribuciones, siendo la GEV la más confiable. Dicho ajuste resulta de gran utilidad para en el diseño y operación de obras portuarias. Si bien se presentan resultados en Rosario, por la extensión del modelo hidrodinámico es posible realizar la misma evaluación en cualquier punto de la red fluvial.

Se dispone de la base de información hidrométrica actualizada y la capacidad de modelación hidrológica e hidrodinámica como para evaluar eventuales estiajes pronunciados en el arco portuario agua abajo de Paraná – Santa Fe, con la consiguiente afectación de la navegación comercial.

BIBLIOGRAFIA

Bronstein, Pablo Mario (2000) “Definición de Calados Navegables en el Río Paraná con el Registro Histórico Corregido”. Consultor, Profesor Titular de Hidráulica Gral. UTN Regional Avellaneda.

Goniadzki Dora, Borús Juan y Soldano Álvaro (2000) “Situaciones de Alerta y Pronósticos en Tiempo Real 1997 – 2000; De la Inundación al Estiaje Severo”. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente, INA, Sistemas de Información y Alerta Hidrológico. Conagua 2000 en Río Hondo.

Goniadzki Dora y Borús Juan (2009) “Variabilidad climática y alturas hidrométricas en los ríos Paraná y Paraguay”. Instituto Nacional del Agua y del Ambiente, INA, Sistemas de Información y Alerta Hidrológico. Revista Hydria 2009.

García Marina, Basile Pedro y Riccardi Gerardo (2011) “Estudio de Registros de Caudales y Niveles Hidrométricos para Grandes Crecidas sobre Tramo del Río Paraná”. XXIII Congreso del Agua, Resistencia.

SabarotsGerbec, M.,(2014). “Estudio de la dinámica superficial de la red de canales del Delta Medio del río Paraná”. II Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, Ezeiza, Argentina.