

Memorias del Encuentro Argentino de Ingeniería

- | Enseñanza de la Ingeniería-CAEDI
- | Gestión de la Educación en Ingeniería
- | Agrimensura, Geodesia y Ciencias de la tierra y el mar
- | Biotecnología y Bioingeniería
- | Materiales y Nanotecnología aplicada a los materiales
- | Desarrollo Tecnológico Social, Vinculación Universidad, Empresa y Estado
- | Ejercicio Profesional de la Ingeniería, Empresas y Servicios
- | Ferroviaria, Automotriz, Naval y Transporte
- | Alimentos y Agroindustria
- | Agronomía y Forestal
- | Energía, Energías Limpias, Energías Renovables y Eficiencia Energética
- | Ingeniería Sostenible, Gestión Ambiental y Cambio Climático
- | Innovación y Emprendedorismo en Ingeniería
- | Mujeres en Ingeniería y Cambio Social
- | Obras y Proyectos de Ingeniería, Infraestructura y Conservación del Patrimonio
- | Tecnología de la Información y Comunicación



Memorias del Encuentro Argentino de Ingeniería : edición 2022 / José Basterra...

[et al.] ; contribuciones de Carolina Orcola ; compilación de Martina Perduca ; prólogo de Nestor Braidot ; Jose Basterra. - 1a ed compendiada. - Corrientes : Universidad de la Cuenca del Plata. Secretaría de Políticas del Conocimiento, 2023.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-4050-08-3

1. Ingeniería. 2. Educación. I. Basterra, José, prolog. II. Orcola, Carolina, colab. III. Perduca, Martina, comp. IV. Braidot, Nestor, prolog.

CDD 620.007

ISBN 978-987-4050-08-3



9 789874 050083

¿Predicen los estiajes marcados futuras crecientes del río Paraná?

Pilar, Jorge Víctor ^{a,b}; Depettris, Carlos Alberto ^a; Gómez, Marcelo Justo Manuel ^a

^a Grupo de Investigación del Departamento de Hidráulica – Facultad de Ingeniería – UNNE

^b Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Misiones (Argentina)

jvpilar@gmail.com

Resumen

La Cuenca del Plata está sufriendo un período de aguas bajas y para encontrar situaciones similares es necesario remontarse muchas decenas de años en el pasado. Ello impacta en los niveles y caudales del río Paraná en la sección Corrientes.

Personas no vinculadas a los ambientes académicos suelen comentar que, luego de un estiaje tan fuerte, podría ser esperable en el futuro cercano una situación “rebote”, es decir una inundación. Pero, ¿existen evidencias empíricas que sustenten ese tipo de afirmaciones?

Para responder a esa pregunta se planteó un análisis exploratorio, buscando evidencias empíricas a través del análisis de gráficos elaborados al efecto, sin llegar a profundizar en validaciones de tipo estadísticas, que podrían ser objeto de un trabajo futuro.

Se analizó la serie de caudales medios diarios en la sección Corrientes para el período que va desde el año hidrológico 1969-70 hasta el 2019-20, denominada “serie moderna”, obtenida de la Base de Datos Hidrológica Integrada del Sistema Nacional de Información Hídrica – República Argentina. Con esos datos se calcularon los caudales medios mensuales, que fueron el material de base para el estudio.

Para cada año hidrológico se determinó el mínimo de los caudales medios mensuales y el máximo de los siguientes cinco años. Luego, esos datos se procesaron para obtener sus estadísticas, las que se correlacionaron entre sí y en forma cronológica.

Los resultados de los análisis realizados no mostraron evidencia de que los principales estiajes registrados sean predictores de crecidas extraordinarias en los cinco años subsiguientes.

Abstract

The Plata basin is facing a low water period of such magnitude that in order to find similar situations it is necessary to go back many years ago. This condition impacts on the levels and flows of Paraná River at the section or Corrientes.

Some people who are not related to the study environment say that after strong severe low water levels of Paraná River, a rebound effect could be expected in a close future, that is to say a flooding. But, is there any empirical evidence that support such statements?

To answer this question, an exploration analysis was presented, in order to look for these empirical evidences through the visual analysis of graphics which were developed to that effect, with no deepening in statistical validations, that could be the object of a future work.

In the present work the series of daily mean flowrates at Corrientes sections from the period of the hydrological year of 1969-70 to 2019-20, which is called the “modern series”, and that was obtained from the Integrated Hydrological Data Base 2020 (Public Work Department, Ministry of Infrastructure and Water Policy- National System of Hydric Information- Argentina) were analyzed. With these data the monthly mean flowrates were calculated, and they were the base material for the study,

Then, for each hydrological year a minimum and a maximum of monthly mean flowrates for the next five years were determined. After that, these data were processed to obtain their descriptive statistics, which were related among them and also in a chronologic way.

The results of the conducted analysis don't show evidence of that the principal stretches are predictors of extraordinary overflows in the next five years.

Palabras claves: Estiaje, crecidas, estadísticas, predictores, inundación.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del río Paraná está atravesando su segundo año de estiajes extremos, situación que comenzó a finales del año 2019, y cuya dimensión parece sostenerse en el tiempo sin un horizonte de final definido, que implicaría el retorno a los niveles y caudales identificados como “normales”, como puede observarse en la Figura 1. En ese contexto, los datos observados en la sección Corrientes indicada en la Figura 2, que marca el límite entre el Paraná Superior y el Paraná medio, constituyen un registro significativo para analizar e intentar alguna prognosis con base estadística, ya que se dispone de una serie de 115 años hidrológicos: desde 1904 hasta la actualidad.

Ante la ocurrencia reciente de ciclos de años húmedos e hiper húmedos con otros de estiajes (o sequías) más o menos pronunciados, el interrogante que comúnmente se plantea durante el tránsito de algunos de esos ciclos típicos es en qué momento y con qué magnitud se puede revertir la situación, y en ese caso qué posibilidades de un evento extremo de signo opuesto existen en el escenario planteado.

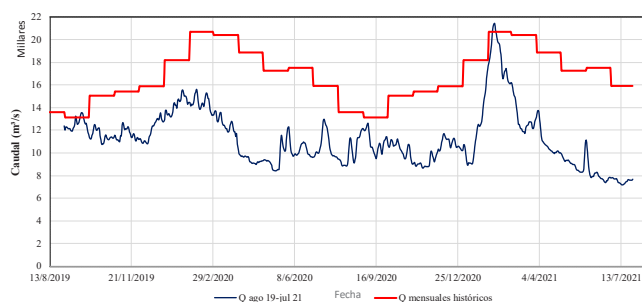


Figura 1: Evolución de la bajante de los años hidrológicos 2019/20 y 2020/21 en la sección Corrientes, comparada con los caudales medios mensuales de la serie histórica.



Figura 2: Ubicación geográfica de la estación Corrientes. (Fuente: Google Earth).

METODOLOGÍA

Actualmente, se dispone de estudios ([1] y [2]) que demuestran que la serie moderna del río Paraná,

comprendida entre 1970 y 2016, refleja el fuerte proceso de antropización de esta región de la Cuenca del Plata durante los últimos 50 años, en los que se construyeron numerosas presas de embalse y desaparecieron bosques nativos como consecuencia del avance de las áreas agrícolas, entre otras intervenciones humanas. Por esa razón, este análisis se centró en el comportamiento de la variable caudal medio mensual en la serie moderna. La fuente de información ha sido la Base de Datos Hidrológica Integrada 2021 (Ministerio de Obras Públicas Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica – Sistema Nacional de Información Hídrica – República Argentina), que proporciona una información confiable y actualizada de los caudales mensuales en Corrientes, permitiendo disponer de la serie moderna, que cuenta con 51 años hidrológicos: 1969/70-2019/20 [3].

Selección y análisis de la muestra

La muestra seleccionada para el análisis corresponde a la serie de caudales medio mensuales, con la que se determinó para cada año hidrológico los valores mínimos de estos y el correspondiente valor máximo de caudal para los cinco años subsiguientes.

En la Tabla 1 se presentan, a modo de síntesis y ordenados por año hidrológico, esos valores de caudales mínimos y los máximos de los 5 años siguientes.

Tabla 1: Caudales medios mensuales mínimos y máximos de los 5 años subsiguientes, por año hidrológico

Año Hidrológico	Q med Mensual Mínimo (m³/s)	Q med Mensual Máximo (*)	Año Hidrológico	Q med Mensual Mínimo (m³/s)	Q med Mensual Máximo (*)
1969/1970	7,400.00	26,728.00	1995/1996	12,134.00	40,025.00
1970/1971	8,086.00	26,728.00	1996/1997	13,232.00	40,025.00
1971/1972	8,560.00	34,023.00	1997/1998	17,260.00	21,619.00
1972/1973	14,153.00	34,023.00	1998/1999	15,124.00	22,294.00
1973/1974	14,760.00	34,023.00	1999/2000	11,248.00	22,820.00
1974/1975	11,699.00	34,023.00	2000/2001	11,980.00	22,820.00
1975/1976	12,789.00	34,023.00	2001/2002	11,247.00	28,494.00
1976/1977	12,717.00	33,382.00	2002/2003	13,609.00	28,494.00
1977/1978	11,032.00	54,468.00	2003/2004	13,964.00	28,494.00
1978/1979	11,816.00	54,468.00	2004/2005	13,190.00	30,178.00
1979/1980	17,595.00	54,468.00	2005/2006	14,063.00	30,178.00
1980/1981	12,703.00	54,468.00	2006/2007	14,364.00	30,178.00
1981/1982	12,128.00	54,468.00	2007/2008	13,894.00	30,178.00
1982/1983	17,882.00	33,900.00	2008/2009	12,695.00	30,178.00
1983/1984	15,586.00	28,545.00	2009/2010	16,264.00	26,955.00
1984/1985	15,709.00	28,545.00	2010/2011	14,786.00	35,812.00
1985/1986	10,965.00	28,545.00	2011/2012	15,068.00	35,812.00
1986/1987	13,697.00	42,920.00	2012/2013	14,329.00	35,812.00
1987/1988	13,404.00	42,920.00	2013/2014	15,871.00	35,812.00
1988/1989	10,583.00	42,920.00	2014/2015	16,756.00	35,812.00
1989/1990	13,778.00	42,920.00	2015/2016	16,294.00	-
1990/1991	13,000.00	42,920.00	2016/2017	15,586.00	-
1991/1992	12,539.00	38,019.00	2017/2018	14,562.00	-
1992/1993	14,750.00	40,025.00	2018/2019	14,049.00	-
1993/1994	14,065.00	40,025.00	2019/2020	9,816.00	-
1994/1995	12,553.00	40,025.00			

(*) 5 años subsiguientes

Los datos indicados en Tabla 1 se presentan reordenados en Tabla 2, con los caudales medios mensuales mínimos expresados en orden creciente.

Tabla 2: Caudales medios mensuales mínimos ordenados por orden creciente

Año Hidrológico	Qmed Mensual Mínimo (m³/s)	Qmed Mensual Máximo (*)	Año Hidrológico	Qmed Mensual Mínimo (m³/s)	Qmed Mensual Máximo (*)
1969/1970	7,400.00	26,728.00	2007/2008	13,894.00	30,178.00
1970/1971	8,086.00	26,728.00	2003/2004	13,964.00	28,494.00
1971/1972	8,560.00	34,023.00	2005/2006	14,063.00	30,178.00
1988/1989	10,583.00	42,920.00	1993/1994	14,065.00	40,025.00
1985/1986	10,965.00	28,545.00	1972/1973	14,153.00	34,023.00
1977/1978	11,032.00	54,468.00	2012/2013	14,329.00	35,812.00
2001/2002	11,247.00	28,494.00	2006/2007	14,364.00	30,178.00
1999/2000	11,248.00	22,820.00	1992/1993	14,750.00	40,025.00
1974/1975	11,699.00	34,023.00	1973/1974	14,760.00	34,023.00
1978/1979	11,816.00	54,468.00	2010/2011	14,786.00	35,812.00
2000/2001	11,980.00	22,820.00	2011/2012	15,068.00	35,812.00
1981/1982	12,128.00	54,468.00	1998/1999	15,124.00	22,294.00
1995/1996	12,134.00	40,025.00	1983/1984	15,586.00	28,545.00
1991/1992	12,539.00	38,019.00	1984/1985	15,709.00	28,545.00
1994/1995	12,553.00	40,025.00	2013/2014	15,871.00	35,812.00
2008/2009	12,695.00	30,178.00	2009/2010	16,264.00	26,955.00
1980/1981	12,703.00	54,468.00	2014/2015	16,756.00	35,812.00
1976/1977	12,717.00	33,382.00	1997/1998	17,260.00	34,456.00
1975/1976	12,789.00	34,023.00	1979/1980	17,595.00	54,468.00
1990/1991	13,000.00	42,920.00	1982/1983	17,882.00	33,900.00
2004/2005	13,190.00	30,178.00			
1996/1997	13,232.00	40,025.00			
1987/1988	13,404.00	42,920.00			
2002/2003	13,609.00	28,494.00			
1986/1987	13,697.00	42,920.00			
1989/1990	13,778.00	42,920.00			

(*) 5 años subsiguientes

Para la serie estudiada se calcularon sus estadísticas: media, desvío estándar, coeficiente de variación, coeficiente de asimetría, coeficiente de Curtosis, valor máximo y mínimo [4]. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3, que corresponden, como ya se indicó, al período 1969/1970 a 2019/2020.

Tabla 3: Estadísticas descriptivas de los caudales medios mensuales en m³/s.

Período (año hidrológico)	1969/1970 – 2019/2020
Media	18,856.6
Mediana	17,910.0
Moda	14,760.0
Desviación estándar	5,877.9
Varianza de la muestra	34,549,141.8
Curtosis	6.0
Coeficiente de asimetría	1.8
Mínimo	7,400.0
Máximo	54,468.0
Cuenta	612

Los cuartiles de los caudales mensuales mínimos de la Tabla 2, ordenados por orden de magnitud, son: cuartil 1: 12,129.5m³/s, cuartil 2: 13,506.5m³/s, cuartil 3: 14,757.5 m³/s y cuartil 4: 17,882.00m³/s.

En Tabla 4 se presentan, ordenados para cada cuartil, los valores de caudal medio mensual Máximo de los 5 años subsiguientes.

Tabla 4: Caudales medios mensuales Máximos para 5 años subsiguientes, por cuartiles, en m³/s.

	Cuartil 1 12,129.50	Cuartil 2 13,506.50	Cuartil 3 14,757.50	Cuartil 4 17,882.00
1	26,728.00	38,019.00	28,494.00	34,023.00
2	26,728.00	40,025.00	42,920.00	35,812.00
3	34,023.00	30,178.00	42,920.00	35,812.00
4	42,920.00	54,468.00	30,178.00	22,294.00
5	28,545.00	33,382.00	28,494.00	28,545.00
6	54,468.00	34,023.00	30,178.00	28,545.00
7	28,494.00	42,920.00	40,025.00	35,812.00
8	22,820.00	30,178.00	34,023.00	26,955.00
9	34,023.00	40,025.00	35,812.00	35,812.00
10	54,468.00	42,920.00	30,178.00	34,456.00
11	22,820.00		40,025.00	54,468.00
12	54,468.00			33,900.00
13	40,025.00			

En el contexto de la actual situación caracterizada por un estiaje muy fuerte del río Paraná, se buscó indagar de manera empírica si existen evidencias de que un período de aguas muy bajas sea seguido de un ciclo de caudales máximos en un horizonte de tiempo cercano, tomando un “lag” de hasta cinco años hidrológicos, lo cual requiere un conocimiento adicional que va más allá del simple análisis de niveles (o caudales) críticos. Dicho en otras palabras, el análisis que se propone es investigar la probabilidad condicional de que, habiendo ocurrido un año de sequía extrema, ocurran en el o los años inmediatos siguientes, hasta un máximo de cinco años, valores extremos máximos de diferentes magnitudes.

RESULTADOS

Para un primer análisis de los datos que se procesaron se representaron en abscisas los cuartiles de la serie de caudales mínimos mensuales, ya que como medidas estadísticas de posición tienen la propiedad de dividir la serie en cuatro grupos de números iguales de términos, y en ordenadas los cuartiles de caudales máximos mensuales de hasta los cinco (5) años

siguientes. La representación en cuartiles, además de ser de amplia utilización, es apta para su empleo en la determinación de estratos o grupos correspondientes a fenómenos naturales. Para este caso, los resultados son presentados en la Figura 3.

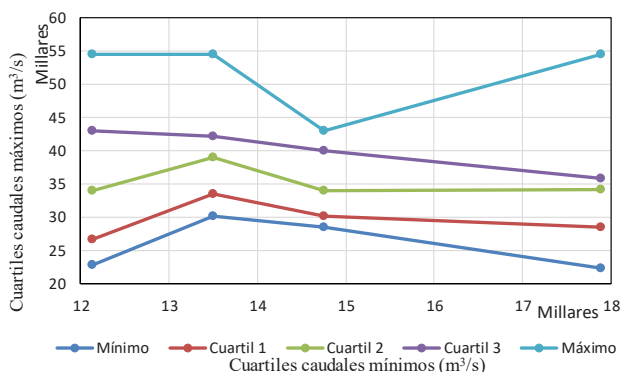


Figura 3: Representación en cuartiles de los caudales mensuales mínimos y máximos en la sección Corrientes.

La representación gráfica (Figura 3) está mostrando que, para el caso del río Paraná en la sección Corrientes, no hay singularidades asociadas con alguno de los cuartiles de caudales mínimos: en el primer cuartil, que es el asociado con la situación actual (12,100.00 m³/s), el rango de caudales máximos mensuales que se sucedieron en los años siguientes hasta un período de 5, abarca una franja amplia que va desde valores tan bajos como 23,000.00 m³/s, hasta 55,000.00 m³/s, que está asociado a la máxima crecida del Siglo XX (1982/83). La evidencia empírica muestra que, sin grandes diferencias, ese patrón se replica con los restantes cuartiles, lo que estaría mostrando que no habría evidencias que preanuncien un salto, desde un extremo mínimo como el actual, a un extremo máximo como los de las grandes crecidas de la última veintena del siglo pasado.

Otra forma de analizar el escenario consistió en representar los caudales mínimos mensuales por año hidrológico contra los caudales máximos mensuales en los 5 años subsiguientes, como se muestra en la Figura 4.

Se observa que los extremos mínimos del registro moderno (lo que sucede actualmente), del orden de los 8,000.00 m³/s, se asocian con crecidas ordinarias en los siguientes 5 años, ya que las mismas no superan los 34,000.00 m³/s. Por otra parte, hay un núcleo dominado por el 50 % de los valores observados, donde los valores mínimos oscilan entre 12,000.00 y 15,000.00 m³/s, en el que los caudales máximos de los 5 años siguientes van desde 22,000.00 a 43,000.00 m³/s. Además, el caudal extremo de la mayor crecida del registro (1983) estuvo precedido por una dispersión de

mínimos que se situaron entre 11,000.00 y 17,700.00 m³/s.

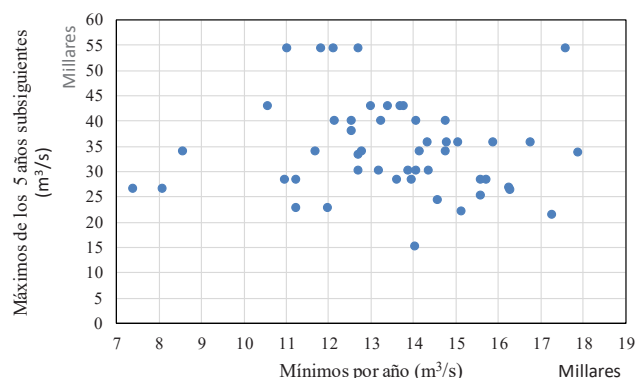


Figura 4: Representación de los caudales mínimos medios mensuales contra los caudales máximos mensuales en los 5 años subsiguientes, en la sección Corrientes del río Paraná.

Una representación cronológica de la serie moderna de caudales mínimos y máximos mensuales se presenta en la Figura 5, donde pueden observarse aspectos del comportamiento fluvial en los años recientes que resultan interesantes. Asumiendo la independencia estadística en la ocurrencia de los caudales extremos mensuales, lo cual ha quedado demostrado en estudios anteriores [5], pueden determinarse las tendencias de ambas series durante el período analizado. Mientras la serie de caudales máximos mensuales marca una clara declinación desde 42.000 m³/s, a principios de los años '70, a 25.000 m³/s en la actualidad, la serie de caudales mínimos muestra una marcada estabilidad que la lleva a oscilar en un rango muy estrecho, entre 11.000 y 15.000 m³/s.

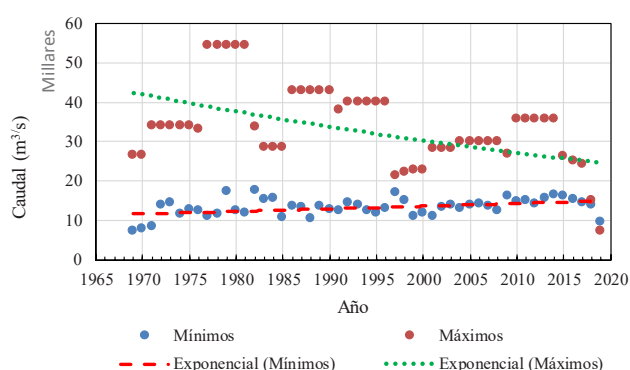


Figura 5: Cronología de los caudales mínimos y máximos mensuales de la sección Corrientes del río Paraná, para el período 1969/70-2020/21.

En el caso de los caudales mínimos estaría bastante clara la influencia de las más de 57 represas construidas y operando en el Paraná Superior [6], [7], las cuales, a través de su objetivo principal de generación hidroeléctrica, tienden a retener la mayor cantidad de agua posible, dotando a la cuenca de una capacidad de

regulación artificial en los períodos de estiajes muy marcados, como lo es el actual.

¿Podría argumentarse del mismo modo al analizar la tendencia decreciente de los caudales máximos, teniendo en cuenta el objetivo secundario que todo sistema de represas puede tener para la regulación de las crecidas? No resulta sencillo en este caso dar una respuesta concluyente teniendo en cuenta que en una crecida extraordinaria, como la de 1983, el río Paraná incrementa el aporte, medido en la sección Corrientes, anualmente, en un volumen del orden de los 625 km³ (1.150-525), más del doble del aporte medio anual, y considerando que las grandes represas como Yacyretá (con un reservorio de 21 km³), Itaipú (29 km³), Ilha Solteira (21,2 km³) y otras seis de las mayores del sistema Paraná almacenan un volumen máximo que solo alcanza el 18.8 % de ese incremento anual.

Por otra parte, la Figura 5 muestra un singular escenario de las tendencias representadas, donde la serie moderna se encamina hacia una convergencia del rango entre mínimos y máximos. En este caso, varios pueden ser los factores determinantes de ese comportamiento, conformando, por lo tanto, un proceso complejo.

Un estudio cronológico de la incorporación de las más de 57 represas en operación puede ser un indicador de la forma en que la cuenca fue incrementado artificialmente su capacidad de regulación, sin por ello desechar las evidencias de un sensible incremento en el régimen de precipitaciones de la Cuenca del Plata con diferencias según la región y la época del año, a partir de, aproximadamente, el último tercio del siglo pasado [8].

CONCLUSIONES

Analizados los años de caudales extremos mínimos en la serie moderna del río Paraná en la sección Corrientes, no surgen evidencias empíricas que permitan predecir la ocurrencia cercana, para un lapso de hasta 5 años, de extremos máximos que generen situaciones de inundación.

Las series de los extremos mínimos y máximos mensuales organizados por cuartiles muestran que no debería haber una alerta por posible incremento de caudales y alturas desde la situación actual hacia valores máximos, como los ocurridos en la última veintena del siglo pasado.

En la ocurrencia de los caudales mínimos mensuales no debe descartarse sin un análisis profundo previo la influencia de las represas construidas durante el período analizado, especialmente en territorio de Brasil. Ellos muestran una tendencia creciente que

resulta razonable adjudicar a la mayor capacidad de regulación artificial generada por esas represas.

Cabe aclarar que lo expresado en el primer párrafo de este apartado se refiere a evidencias empíricas, que pueden ser observadas visualmente en los gráficos presentados. Esas afirmaciones podrían validarse con un estudio estadístico más profundo, pero que excede al objetivo de este trabajo, que tuvo carácter exploratorio.

Los resultados obtenidos tal vez no fueron inesperados, porque la ocurrencia de las inundaciones y de estiajes críticos responden a procesos hidrológicos que, en principio, no estarían correlacionados, hipótesis que podría ser motivo de otra investigación específica.

Sin embargo, como se mencionó en el Resumen, es común escuchar que personas no vinculadas a los ambientes académicos comenten que, luego de un estiaje crítico, en un futuro cercano podría darse una situación “rebote”, es decir una inundación.

REFERENCIAS

- [1] Gómez, M., Pilar, J., Ruberto, A., Depettris, C., Méndez, G. (2019). Verificación de la estabilidad estadística de la serie de caudales del río Paraná en la sección Corrientes. Aqua-LAC Volumen 11(2), 50-58. doi: 10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-05
- [2] Gómez M., Pilar J., Ruberto A., Depettris C., Mendez G. (2020) “Efecto de la extensión de la serie temporal en la estimativa de recurrencias de eventos hidrológicos críticos” In: Revista Argentina de Ingeniería. Río Cuarto - Córdoba: Departamento de imprenta y publicaciones de la Universidad Nacional de Río Cuarto. Vol.15. N°5. pp.85 - 96. ISSN 2314-0925.
- [3] Base de Datos Hidrológica Integrada 2021. Datos de caudales medio mensuales de la estación Corrientes (3805) Ministerio de Obras Públicas Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica – Sistema Nacional de Información Hídrica – República Argentina. Fecha de acceso: 25/08/2021. <https://www.argentina.gob.ar/obras-publicas/hidricas/base-de-datos-hidrologica-integrada>
- [4] Naghettini M., De Andrade P. (2007); *Hidrología Estadística*. Editora del Servicio Geológico do Brasil. ISBN 978-85-7499-023-1. Belo Horizonte (Brasil).
- [5] Paoli, C., Cacik, P. (2020); *Régimen de crecidas y análisis de caudales máximos*, Cap. 3 del libro El río Paraná en su tramo medio. Tomo I. C. Paoli y M. Schreider, Editores. 2ª edición actualizada. Ediciones UNL, Santa Fé.

- [6] Chao B. F., Wu Y. H., Li Y. S. (2008); *Impact of Artificial Reservoir Water Impoundment on Global Sea Level*. Science 320 (5): 212-214.
- [7] Itaipu Binacional. Cuenca del Paraná. itaipu.gov.py (online). [Consultado el 23 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://www.itaipu.gov.py/es/energia/cuenca-del-parana>
- [8] Barros V., Clarke R. y Silva Días P. (2006); *El cambio climático en la Cuenca del Plata* - 1a ed. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET, Buenos Aires.