

ANÁLISIS DE CAUDALES DEL RÍO PARANÁ Y CONTEXTUALIZACIÓN DE LAS BAJANTES EN LOS AÑOS HIDROLÓGICOS 2019/20, 2020/21 Y 2021/22

FLOW ANALYSIS OF THE PARANA RIVER AND CONTEXTUALIZATION OF LOW FLOWS IN 2019/20, 2020/21 AND 2021/22 HYDROLOGICAL YEARS

Pedro A. Basile^{(1)(2)(*)} y Gerardo A. Riccardi^{(1)(2)(3)(**)}

⁽¹⁾Departamento de Hidráulica – Escuela de Ingeniería Civil (FCEIA – UNR), Argentina.

⁽²⁾Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (FCEIA – UNR), Argentina.

⁽³⁾Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Rosario (CIUNR), Argentina.

^(*)e-mail: pbasile@fceia.unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8826-0621>

^(**)e-mail: riccardi@fceia.unr.edu.ar. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9294-3166>

RESUMEN

En este artículo se presenta el análisis de caudales del río Paraná, a escala temporal diaria, mensual, anual y plurianual; considerando los caudales medios diarios encauzados correspondientes a la serie de años hidrológicos 1904/05-2021/22, observados en la sección de aforos Timbúes. En dicho marco, se contextualizan y caracterizan las bajantes registradas en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22. Se observa un incremento de los caudales a partir del inicio de los años '70. Los caudales medios diarios mínimos anuales eran mucho más frecuentes antes del año hidrológico 1971/72; lo contrario ocurre con los correspondientes caudales máximos. El hidrograma medio anual de la sub-serie 1971/72-2021/22, es mayor y muestra menor diferencia entre el caudal máximo y mínimo que el de 1904/05-1970/71. El caudal módulo anual en la sub-serie 1904/05-1970/71 es de 14168 m³/s y en la sub-serie 1971/72-2021/22 es de 17493 m³/s, es decir, se observa un incremento de 3325 m³/s a partir del año 1971/72. En tal contexto se verifican las bajantes de los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22, las cuales presentan anomalías negativas de caudales medios anuales iguales a -5253 m³/s (2019/20), -7034 m³/s (2020/21) y -7521 m³/s (2021/22), es decir, las mayores anomalías negativas del río Paraná en los 118 años con registros aquí considerados.

Palabras Claves: Análisis de caudales, Río Paraná, Sección aforos Timbúes.

ABSTRACT

This paper presents the flow analysis of the Paraná River, on a daily, monthly, annual and multi-annual time scale; considering the average daily flows corresponding to the series of hydrological years 1904/05-2021/22, observed in the main channel at Timbúes gauging section. In said framework, the low flows registered in the hydrological years 2019/20, 2020/21 and 2021/22 are characterized. An increase in flows is observed from the beginning of the 1970s. Annual minimum daily mean flows were much more frequent before the hydrological year 1971/72; the opposite occurs with the corresponding maximum flows. The mean annual hydrograph of the 1971/72-2021/22 sub-series is higher and shows less difference between the maximum and minimum flow than that of 1904/05-1970/71. The annual module flow in the sub-series 1904/05-1970/71 is 14168 m³/s and in the sub-series 1971/72-2021/22 it is 17493 m³/s, that is, an increase of 3325 m³/s is observed from the year 1971/72. In this context, the low flows of the hydrological years 2019/20, 2020/21 and 2021/22 are verified, which present negative anomalies of annual average flows equal to -5253 m³/s (2019/20), -7034 m³/s (2020/21) and -7521 m³/s (2021/22), that is, the largest negative anomalies of the Paraná River in the 118 years with records considered here.

Keywords: Flow analysis, Paraná River, Timbúes gauging section.

INTRODUCCIÓN

Las variaciones del caudal de un río, a lo largo del año hidrológico, están asociadas a factores físicos de la cuenca, tales como: área, topografía, complejo suelo-vegetación, usos del suelo, etc.; y a factores climáticos, entre los cuales, la magnitud y distribución espacial y temporal de las lluvias juegan un rol fundamental.

De esta manera, en un mismo año hidrológico, es decir, a escala temporal intra-anual; debido a la estacionalidad de las lluvias, se observan períodos de crecientes y bajantes. Asimismo, a escala temporal inter-anual; debido a la variabilidad climática, los años con lluvias anuales superiores a las medias anuales o normales, se denominan “años húmedos”, en los cuales las crecientes pueden ser significativas y, por otra parte, en los años con lluvias anuales inferiores a las normales, denominados “años secos”, las bajantes pueden adquirir relevancia. Los impactos de las crecientes o de las bajantes serán más o menos significativos dependiendo de la magnitud de las anomalías de lluvias.

El régimen hidrológico del río Paraná se caracteriza por ciclos de años “húmedos” y “secos”, que se verifican con diversos grados de severidad y extensión temporal. Estos ciclos se traducen en períodos del río durante los cuales los caudales y correspondientes niveles hidrométricos varían entre estados de aguas bajas, medias y altas.

En este trabajo se presenta el análisis de caudales del río Paraná, a escala temporal diaria, mensual, anual y plurianual; considerando los caudales medios diarios correspondientes a la serie de años hidrológicos 1904/05-2021/22, observados en el cauce principal del río Paraná en la sección de aforos Timbúes-km 456.

El objetivo del trabajo es realizar, en el marco de dicho análisis, la contextualización y caracterización de las bajantes registradas en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22; como así también, indagar sobre las causas y describir resumidamente las consecuencias de tales bajantes.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO PARANÁ

El río Paraná nace en la confluencia de los ríos Paranaíba y Grande en Brasil (20°05' S - 51° O). La longitud del río desde dicha confluencia hasta la desembocadura en el río de la Plata (34°20' S - 58°25' O) es de 2570 km, pero si se suma la longitud del río Grande, la misma es de aproximadamente 3900 km. El área de la cuenca del río Paraná, con cierre en el río de la Plata, es de aproximadamente 2.6×10^6 km² e involucra zonas de aporte del Sur de Brasil, todo Paraguay, Norte y Centro de Argentina y Sur-Este de Bolivia, tal como se observa en la Figura 1. En función de la longitud del río (~3900 km) y del área de la cuenca (~2.6 millones de km²), es el segundo sistema fluvial de América del Sur después del Amazonas. Las pendientes del río para aguas medias decrecen gradualmente, con valores que van desde 5×10^{-5} en Corrientes hasta 1.5×10^{-5} en San Pedro.

El principal afluente del río Paraná es el río Paraguay, que nace en la meseta del Mato Grosso en Brasil y confluye sobre margen derecha del río Paraná (27°17' S - 58°36' O) frente a la ciudad de Paso de la Patria en la provincia de Corrientes, unos 30 km aguas arriba de la ciudad de Corrientes. El área de la cuenca del río Paraguay es de 1.1×10^6 km² aproximadamente. La pendiente media del río es del orden de 5×10^{-5} , con valores que disminuyen hasta la mitad cuando atraviesa el Pantanal, una zona de expansión y almacenamiento natural que atenúa y retarda las crecidas del río Paraguay.

Dada la vastedad de la cuenca del río Paraná, en la misma coexisten varios biomas, diversas eco-regiones terrestres y acuáticas, como así también, diferentes zonas climáticas (Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata [CICPLATA], 2017). Las lluvias en las cuencas tributarias de los ríos Paraguay y Alto Paraná (cierre en Paso de la Patria), generan la mayor parte del volumen de agua que fluye por el río Paraná en sus tramos medio e inferior, en territorio argentino desde Paso de La Patria hasta la desembocadura en el río de La Plata. Por otra parte, el río Bermejo, afluente del río Paraguay sobre margen derecha en su tramo inferior (26°51' S - 58°22' O), aporta la mayor parte de la carga de sedimentos del río Paraná.

La magnitud, distribución espacial y temporal de las lluvias a escala regional están gobernadas por el Monzón Sudamericano (Grimm et al., 2005; Misra, 2008; Marengo et al., 2010). Se trata de un sistema de circulación atmosférica estacional de América del Sur, vinculado a los Océanos adyacentes, que gobierna el ciclo de lluvias en el continente sudamericano y, consecuentemente, en la cuenca del río Paraná.

La estación de lluvias, en la parte norte de la cuenca, al norte del Trópico de Capricornio 23°S, es en primavera-verano, con lluvias escasas en otoño-invierno, tal como se observa en los hietogramas de lluvias medias mensuales para Corumbá, Campo Grande, Cuiabá, Brasilia, Goiania, etc. (Figura 1). Sin embargo, al sur del Trópico de Capricornio, en algunos sectores de la cuenca, esta estacionalidad no es marcada, ya que a lo largo del año las lluvias medias mensuales son similares, por ejemplo, esto se observa claramente en los hietogramas correspondientes a Guaira, Porto União, Ciudad del Este, etcétera (Figura 1).

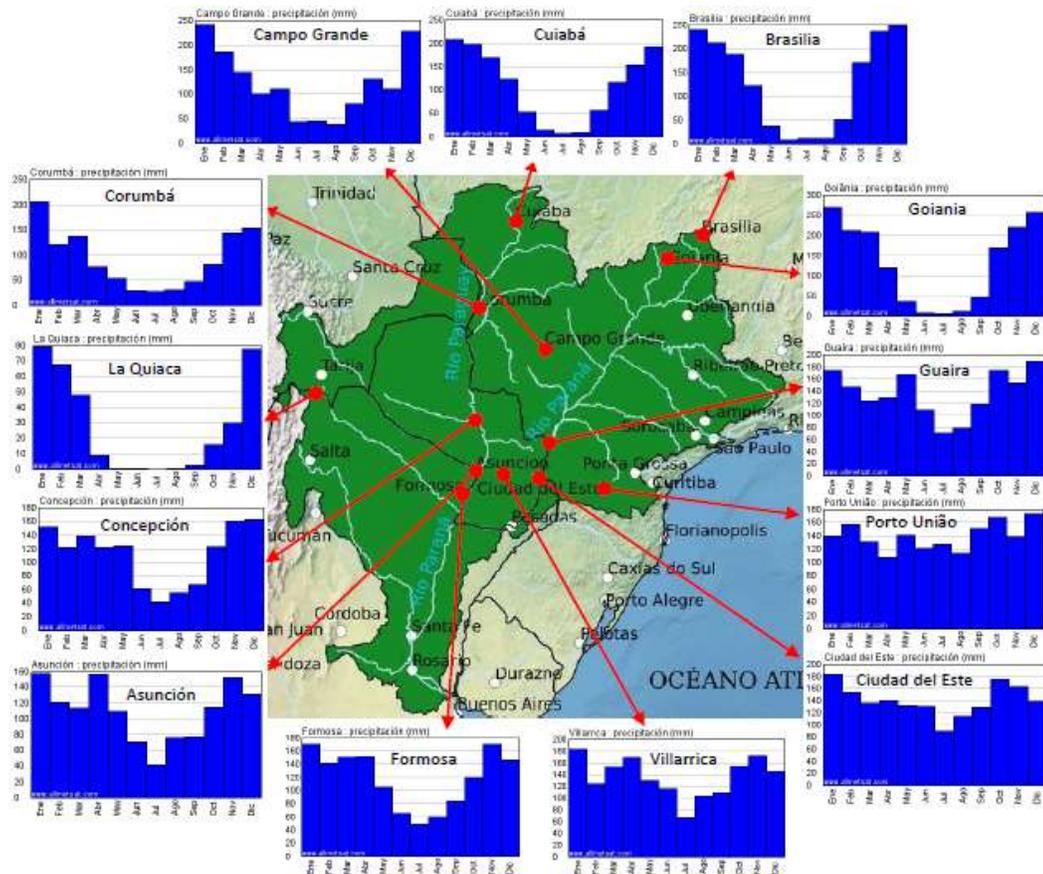


Figura 1. Cuenca río Paraná e hietogramas de lluvias medias mensuales en algunos sectores.

En general, las lluvias máximas trimestrales acumuladas se verifican en diciembre, enero, febrero y las mínimas en junio, julio, agosto. La magnitud de la lluvia media anual en la cuenca es variable y aumenta de Oeste a Este.

En la Figura 2 se observa el mapa de lluvia media anual sobre la parte continental, entre coordenadas 10°-55° S y 80°-35° O, que incluye la cuenca del río Paraná, correspondiente a la serie 1961-1990 (Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur [CRC-SAS], s.f.).

Se registran valores medios anuales inferiores a los 600 mm al Oeste de la cuenca, en sectores con clima

semiárido cálido del Sur de Bolivia y Noroeste de Argentina y núcleos con valores superiores a los 2400 mm al Este, en sectores con clima subtropical húmedo del Sur de Brasil. El valor medio anual, promedio ponderado en el área de la cuenca del río Alto Paraná en Brasil es de 1500 mm (Instituto Nacional de Meteorología de Brasil [INMET], 2021).

La sección de aforos considerada en este estudio se ubica en Timbúes (km 456), es decir, 36 km aguas arriba de Rosario en el km 420 (Figura 1).

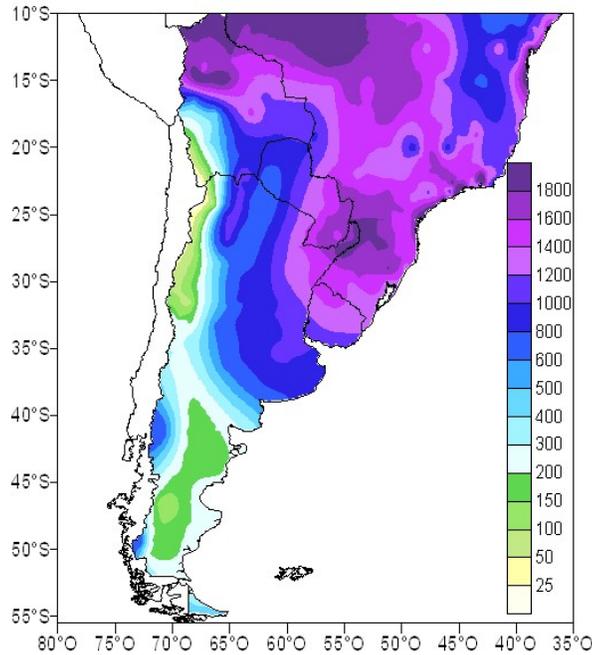


Figura 2. Lluvia media anual 1961-1990 en milímetros (CRC-SAS, s.f.).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los caudales medios diarios (Qmd) encauzados, serie 1905-2020, observados en Timbúes y disponibles en la base de datos del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNHI) (s.f.) fueron procesados, realizando la depuración y el completamiento de datos faltantes.

A tales fines, con los aforos disponibles en el SNHI y de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) (2004, 2006), conjuntamente con los datos de niveles registrados en el hidrómetro de Puerto San Martín (PSM) (Dirección Nacional de Vías Navegables-Distrito Paraná Inferior [DNVN-DPI], 2022), se construyó la curva nivel-caudal (Figura 3), ajustando a los datos observados una curva polinómica de tercer grado, dada por la ecuación (1); la cual se utilizó para completar los caudales faltantes en años con algunos meses sin datos y los años 2020, 2021 y 2022.

La ecuación polinómica de regresión ajustada tiene la siguiente expresión:

$$Q = 20.8 Z_w^3 - 200.4 Z_w^2 + 2781.8 Z_w - 408.7 \quad (1)$$

donde Q es el caudal en (m³/s) y Z_w en (m) es el nivel de la superficie libre del agua del río Paraná en Puerto San Martín (km 448), referido al Instituto Geográfico Nacional (IGN).

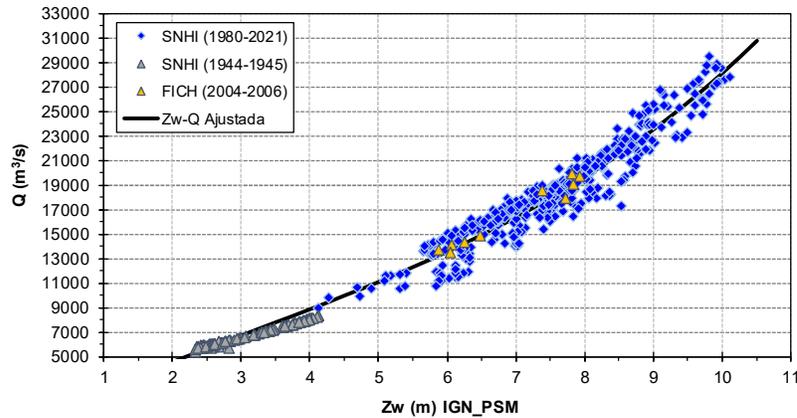


Figura 3. Curva Zw-Q. Río Paraná en PSM (km 448).

En el estudio se procesaron un total de 43200 datos de caudales medios diarios. A partir de los mismos, se determinaron las recurrencias observadas de caudales extremos máximos y mínimos anuales, considerando las dos sub-series que surgen claramente del análisis del comportamiento de los Qmd. Asimismo, mediante un análisis de estadística descriptiva del conjunto total de datos de caudales medios diarios, se construyeron las curvas de duración de caudales correspondientes a cada sub-serie.

Por otra parte, se determinaron los caudales medios mensuales (Qmm) y medios anuales (Qma), a partir de los promedios, a escala temporal mensual y anual respectivamente, de los caudales medios diarios (Qmd). Los caudales módulos mensuales (QMm) se determinaron calculando los promedios de los caudales medios mensuales (Qmm) para la serie de años considerada. Los caudales módulos anuales (QMa) se determinaron calculando los promedios de los caudales medios anuales (Qma), para las sub-series de años consideradas.

El año hidrológico fue definido considerando que comienza el 1 de septiembre de un determinado año y que finaliza el 31 de agosto del año siguiente. De esta manera, todo el periodo que abarca la estación de lluvias en la cuenca, es decir, en primavera-verano, queda comprendido dentro del año hidrológico.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Caudales medios diarios

En la Figura 4 se presentan los datos de Qmd cronológicos, encauzados, registrados en la sección de aforos Timbúes; donde se observa claramente un incremento de los caudales Qmd a partir de inicios de la década de 1970. Tal comportamiento ya había sido detectado en estudios precedentes (Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura [FCEIA], 1989) y cuyas causas se analizarán más adelante. Por otra parte, en el contexto temporal de dicho incremento de los Qmd, se observa una apreciable disminución de los mismos en los últimos años 2019, 2020, 2021 y 2022; a tal punto de ser comparables con los registrados antes del inicio de los '70.

En la Tabla 1 se presenta el análisis de los períodos medios de retorno observados (o recurrencias observadas) de algunos valores característicos de Qmd mínimos y máximos anuales, considerando las sub-series de años hidrológicos 1904/05-1970/71 (67 años) y 1971/72-2021/22 (51 años).

Las recurrencias observadas son definidas como $R=T/N$, donde T es el período de años de la sub-serie y N es el número de años en los cuales, durante T, un determinado valor de Qmd es igualado o superado por exceso

(máximos) o por defecto (mínimos), (Chow et al., 1994). Los valores considerados de Qmd máximos y mínimos están representados en la Figura 4 con líneas de distinto color.

Tabla 1. Recurrencias observadas, Qmd máx. y mín. anuales.

Qmd (m ³ /s)	(1904/05-1970/71)		(1971/72-2021/22)	
	N	R (años)	N	R (años)
Qmd máx. ≥ 25000	2	33.50	10	5.1
Qmd mín. ≤ 11000	65	1.03	10	12.8
Qmd mín. ≤ 9000	45	1.50	4 (†)	17.0
Qmd mín. ≤ 7000	20	3.40	1 (*)	51.0

(†) 1971/72, 2019/20, 2020/21, 2021/22. (*) 2021/22

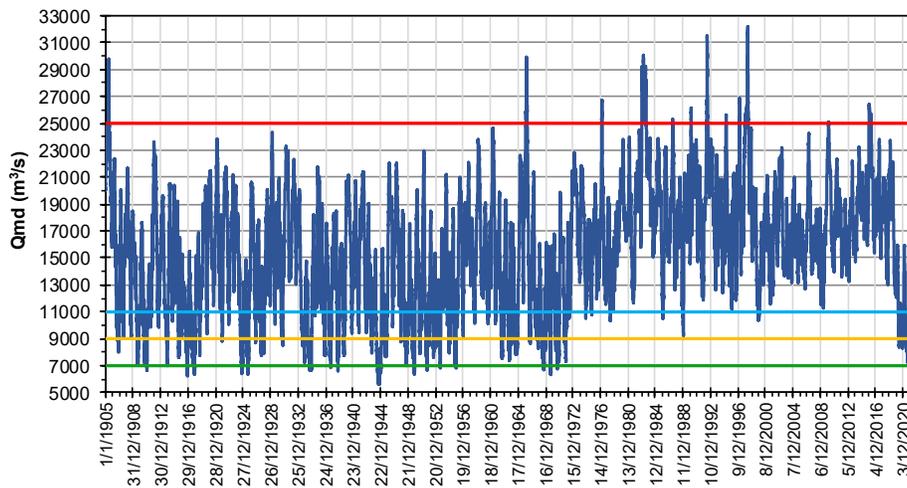


Figura 4. Caudales medios diarios, encauzados en Timbúes (km 456).

En la Tabla 1 se observan recurrencias mucho menores de los Qmd mínimos anuales en la sub-serie 1904/05-1970/71, lo cual indica que los caudales extremos bajos fueron mucho más frecuentes antes del 1971/72. Por ejemplo, antes del 1971/72 el caudal de 9000 m³/s es igualado o superado por defecto cada 1.5 años en promedio; mientras que, después del 1971/72 esto se observa cada 17 años en promedio, con la particularidad que 3 de los 4 valores mínimos se registran en los tres últimos años hidrológicos, es decir, 2019/20 (8360 m³/s), 2020/21 (7230 m³/s) y 2021/22 (6870 m³/s). Cabe señalar que, el Qmd mínimo extremo más severo se produjo en el año hidrológico 1944/45 (5700 m³/s).

Viceversa, para los caudales altos, antes de 1971/72 el caudal de 25000 m³/s es igualado o superado por exceso cada 33.5 años en promedio; mientras que, después del 1971/72 esto se observa cada 5.1 años en promedio. En efecto, después del 1971/72 se registran 10 valores de Qmd ≥ 25000 m³/s (R=5.1 años), entre los cuales se destacan los acontecidos en los años hidrológicos 1982/83 (30050 m³/s), 1991/92 (31400 m³/s) y 1997/98 (32000 m³/s), que produjeron crecidas extraordinarias del río Paraná.

El análisis de estadística descriptiva del conjunto total de Qmd, de ambas sub-series, permite determinar las correspondientes curvas de duración. En tales curvas (Figura 5), en ordenadas se representan los valores de los Qmd registrados y en abscisas el tiempo de excedencia.

El tiempo de excedencia [T exced. (%)], representa el “tiempo adimensional” en número de días respecto al total de días de la sub-serie, durante el cual un determinado Qmd fue igualado o superado. Es decir, es el complemento de la frecuencia relativa acumulada porcentual en términos de número de días.

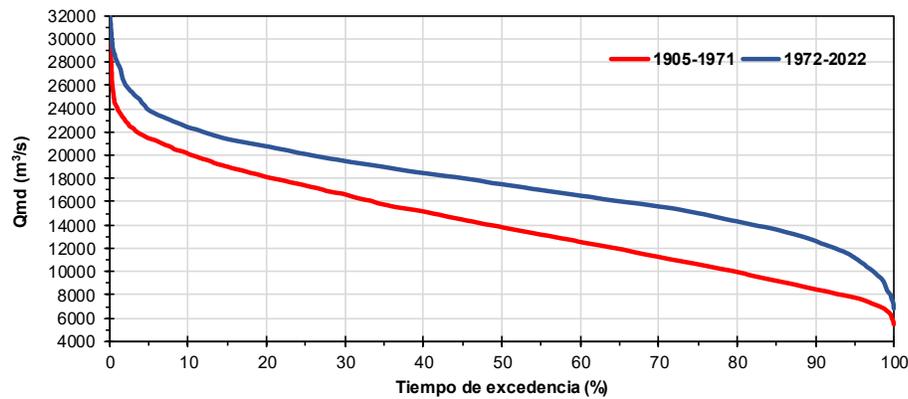


Figura 5. Curvas de duración de Qmd por sub-series.

Por lo tanto, $[100 - T \text{ exced. } (\%)]$ es el “tiempo adimensional” durante el cual un determinado caudal fue igualado o no superado, o sea, es la frecuencia relativa acumulada porcentual en días. $T \text{ exced.} = 0\%$ se corresponde con el valor máximo de la serie Q_0 y $T \text{ exced.} = 100\%$ se asocia al valor mínimo Q_{100} .

En el río Paraná, la relación Q_0/Q_{100} es aproximadamente igual a 5 para el flujo encauzado, lo cual indica una irregularidad hidrológica muy baja, tal como sucede en otros grandes sistemas fluviales del planeta.

En la Figura 5 se observa que la curva de duración 1972-2022 se encuentra por encima de la correspondiente a 1905-1971 para todo tiempo de excedencia. Es decir, para un mismo tiempo adimensional de excedencia asignado, el caudal medio diario es mucho mayor en la sub-serie 1972-2022, con una diferencia más importante para caudales medios-bajos. Por otra parte, un determinado Qmd fijo es igualado o superado durante un tiempo mucho mayor. Esto describe el incremento de los Qmd observado a partir del 1972 y, consecuentemente, el respectivo aumento de la duración de los mismos.

Caudales medios mensuales

En la Figura 6 se presentan los caudales medios mensuales, donde se observa claramente, a partir de la media móvil de 12 (línea roja), el cambio hacia una mayor magnitud de los caudales a partir del inicio de los '70 y una drástica disminución en los tres últimos años.

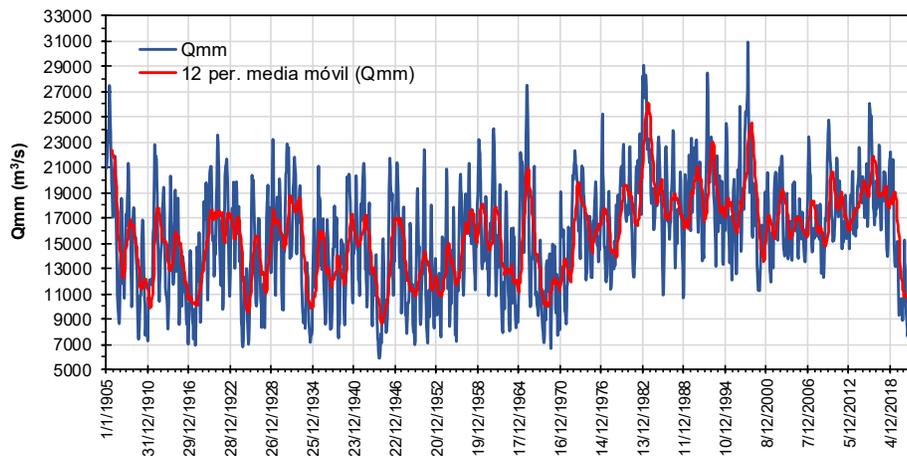


Figura 6. Caudales medios mensuales, encauzados en Timbúes (km 456).

En la Figura 7 se presentan los hidrogramas medios anuales para cada sub-serie, formados por los caudales módulos mensuales QMm de cada sub-serie. Se observa que, el hidrograma medio anual 1971/72-2021/22, es definitivamente mayor y muestra menor amplitud (diferencia entre el caudal máximo y mínimo) que el de 1904/05-1970/71.

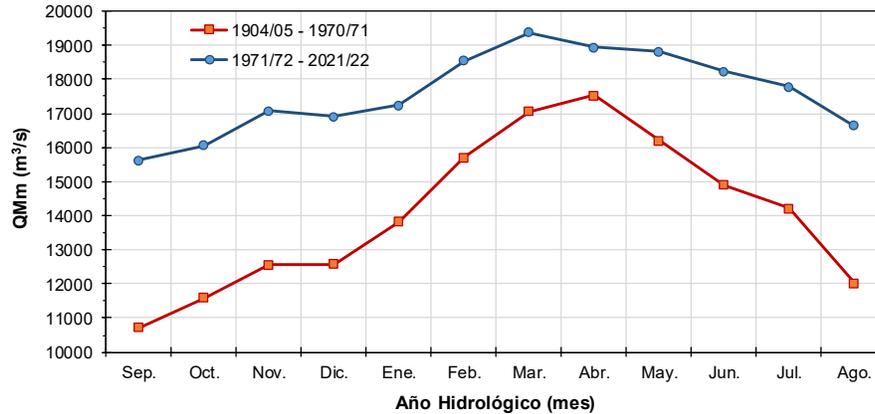


Figura 7. Hidrogramas medios anuales, ambas sub-series, caudales encauzados en Timbúes.

Por otra parte, en términos medios, se observa que, en concordancia con la estacionalidad de las lluvias en la cuenca, es decir, estación lluviosa en primavera-verano y lluvias escasas en otoño-invierno, y con los tiempos de respuesta de la cuenca; el caudal mínimo se observa en septiembre y alcanza el valor máximo en marzo-abril, para luego ir disminuyendo en los meses subsiguientes del año hidrológico.

En la Figura 8 se presentan las anomalías de caudales medios mensuales, AQmm_{j,i}, para los años hidrológicos “secos” 1924/25, 1944/45, 2019/20, 2020/21, 2021/22 y el año hidrológico “húmedo” de mayor duración de caudales 1982/83. Dichas anomalías son definidas en la ecuación (2) como:

$$AQmm_{j,i} = Qmm_{j,i} - QMm_{j,n-k} \quad (2)$$

donde Qmm_{j,i} es el caudal medio mensual del j-ésimo mes y del i-ésimo año hidrológico y QMm_{j,n-k} es el caudal módulo mensual del mes j asociado al período de años hidrológicos n-k de cada sub-serie, los cuales se encuentran representados en la Figura 7.

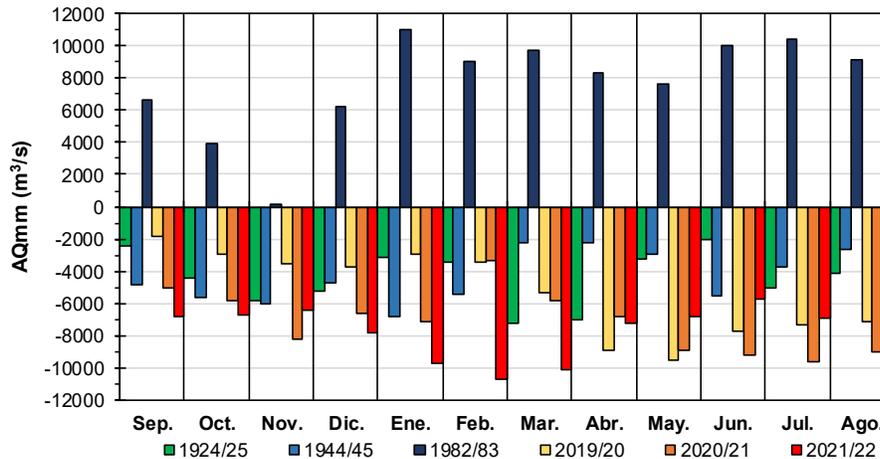


Figura 8. Anomalías de caudales medios mensuales para algunos años hidrológicos.

Las mayores anomalías negativas de Qmm se observan en el año hidrológico 2021/22, en particular para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo; correspondientes a los meses de las máximas lluvias acumuladas en la cuenca. Tales anomalías son de $-7821 \text{ m}^3/\text{s}$ (diciembre), $-9731 \text{ m}^3/\text{s}$ (enero), $-10723 \text{ m}^3/\text{s}$ (febrero) y $-10124 \text{ m}^3/\text{s}$ (marzo). Se trata de las anomalías negativas de Qmm más importantes del río Paraná, observadas en los registros considerados en este estudio.

Caudales medios anuales y volúmenes de escurrimiento

En la Figura 9 se presentan los caudales medios anuales (Qma) y los caudales módulos anuales (QMa) en línea continua color marrón correspondientes a cada sub-serie.

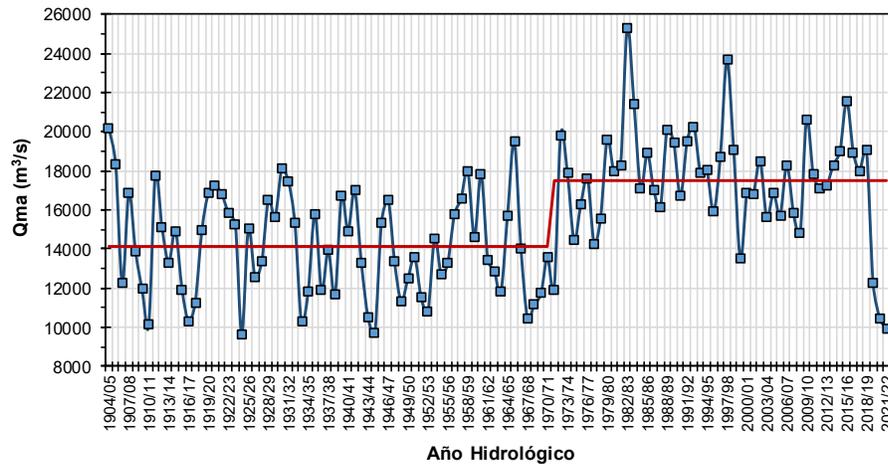


Figura 9. Caudales medios anuales (Qma) y caudal módulo anual por sub-serie (QMa).

En la Figura 9, $QMa=14168 \text{ m}^3/\text{s}$ (1904/05-1970/71) y $QMa=17493 \text{ m}^3/\text{s}$ (1971/72-2021/22), es decir, se observa un incremento de $3325 \text{ m}^3/\text{s}$ en el QMa a partir del 1971/72. Por otra parte, aún en este contexto de incremento del caudal módulo anual QMa, se nota que los caudales medios anuales Qma de los tres últimos años hidrológicos son similares a los observados en años “secos” del periodo 1904/05-1970/71. En la Figura 10 se presentan las anomalías de caudales medios anuales, $AQma_i$, expresadas mediante la ecuación (3):

$$AQma_i = Qma_i - QMa_{n-k} \quad (3)$$

donde Qma_i es el caudal medio anual del i -ésimo año hidrológico y QMa_{n-k} es el caudal módulo anual asociado al periodo de años hidrológicos $n-k$ de cada sub-serie.

Las bajantes observadas en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22, presentan anomalías negativas de caudal medio anual del orden de los $-5253 \text{ m}^3/\text{s}$ (2019/20), $-7034 \text{ m}^3/\text{s}$ (2020/21) y $-7521 \text{ m}^3/\text{s}$ (2021/22). Es decir, las mayores anomalías negativas de caudales medios anuales observadas del río Paraná en toda la historia con registros aquí considerada.

Tales bajantes se asocian a volúmenes de escurrimiento en la cuenca similares a los observados en las bajantes ocurridas antes del 1971/72 en años “secos”; tal como se observa en la Figura 11, donde se representan los volúmenes de escurrimientos anuales (Va) del flujo encauzado y los valores promedio (VMa) por sub-serie (línea roja).

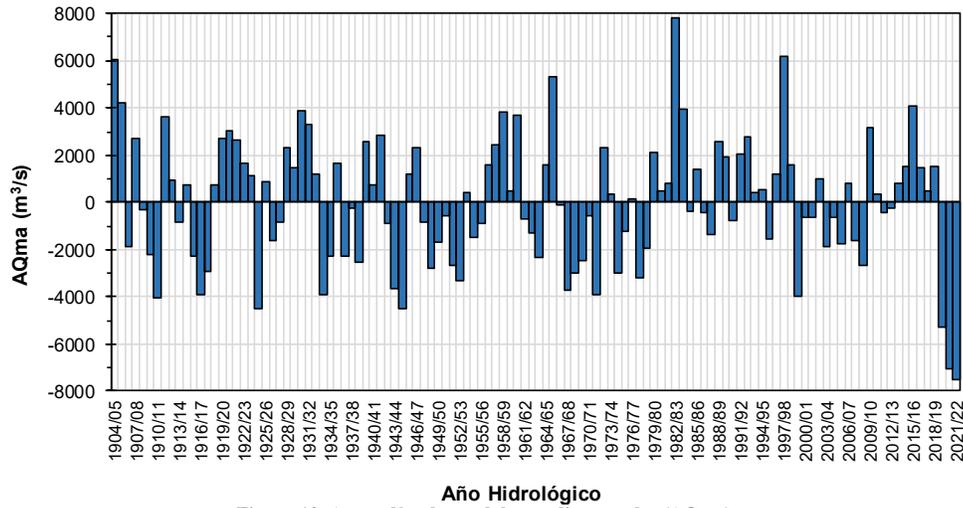


Figura 10. Anomalías de caudales medios anuales (AQma).

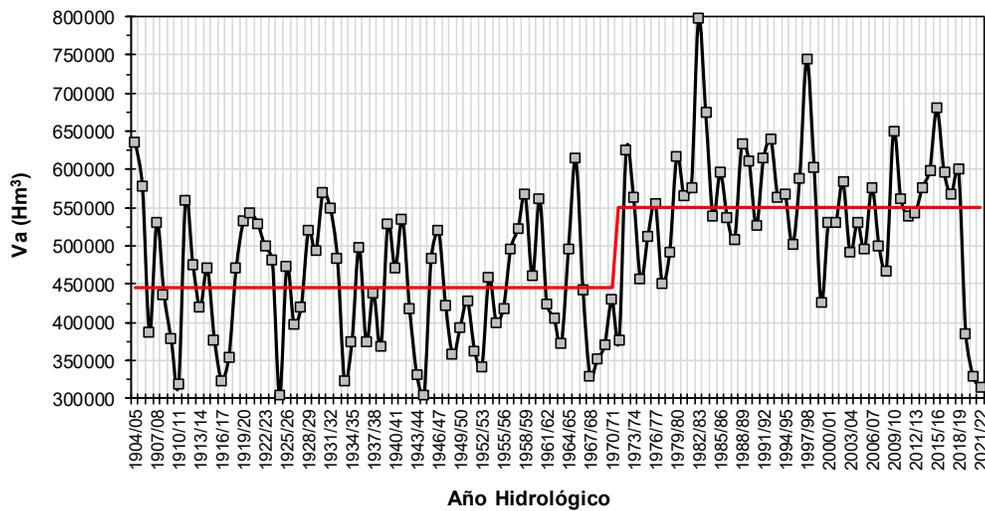


Figura 11. Volúmenes de escurrimientos anuales y valores medios por sub-serie.

En la Tabla 2 se presenta una lista ordenada, en función de los Qma y Va, de los diez años hidrológicos “secos” severos que produjeron las bajantes más significativas del río Paraná. Cabe señalar que estos diez años hidrológicos “secos” se ubican en un rango de Qma muy estrecho (9660 m³/s a 10826 m³/s) y, consecuentemente, también en lo que respecta a los volúmenes de escurrimientos anuales Va (304625 Hm³ a 341349 Hm³). Se observa que, de las diez bajantes más significativas, ocho se verifican en el periodo 1904/05-1970/71 y las dos que restan se ubican en el periodo 1971/72-2021/22, particularmente en los dos últimos años hidrológicos: 2021/2022 (en el puesto 3) y 2020/21 (en el puesto 7).

A los efectos de poner en evidencia la extensión temporal de los años “secos”, en la Tabla 3 se presenta el número de años hidrológicos consecutivos que evidenciaron anomalías de caudales medios anuales AQma < -2000 m³/s. En la sub-serie 1904/05-1970/71 se observan cuatro periodos con 2 años secos consecutivos y dos periodos con 3 años secos consecutivos. En la sub-serie 1971/72-2021/22, el único periodo de 3 años secos consecutivos se observa en los tres últimos años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22.

En la Figura 12 se presentan las anomalías de volúmenes de escurrimientos anuales, AVa_i , expresadas mediante la ecuación (4):

$$AVa_i = Va_i - VMa_{n-k} \quad (4)$$

donde Va_i es el volumen de escurrimiento anual del i -ésimo año hidrológico y VMa_{n-k} es el volumen medio anual asociado al período de años hidrológicos $n-k$ de cada sub-serie.

Tabla 2. Ranking de las 10 bajantes más significativas.

Orden #	Año Hidrológico	Qma (m ³ /s)	Va (Hm ³)
1	1924/25	9660	304625
2	1944/45	9694	305720
3	2021/22	9972	314464
4	1910/11	10126	319334
5	1933/34	10273	323977
6	1916/17	10291	324551
7	2020/21	10459	329820
8	1967/68	10468	330110
9	1943/44	10522	331836
10	1952/53	10826	341394

Tabla 3. Número de años hidrológicos consecutivos con AQma < -2000 m³/s.

Número M	Años Hidrológicos	Qma (m ³ /s)	AQma (m ³ /s)
2	1909/10	11989	-2179
	1910/11	10126	-4042
3	1915/16	11931	-2237
	1916/17	10291	-3877
	1917/18	11265	-2903
2	1933/34	10273	-3895
	1934/35	11867	-2301
2	1943/44	10522	-3646
	1944/45	9694	-4474
2	1951/52	11513	-2655
	1952/53	10826	-3342
3	1967/68	10468	-3700
	1968/69	11154	-3014
	1969/70	11733	-2435
3	2019/20	12240	-5253
	2020/21	10459	-7034
	2021/22	9972	-7521

En concordancia con las anomalías de Qma descritas anteriormente, en la Figura 12 se observa que las mayores anomalías negativas de Va se verifican en los tres últimos años hidrológicos: -165862 Hm³ (2019/20), -221849 Hm³ (2020/21) y -237205 Hm³ (2021/22).

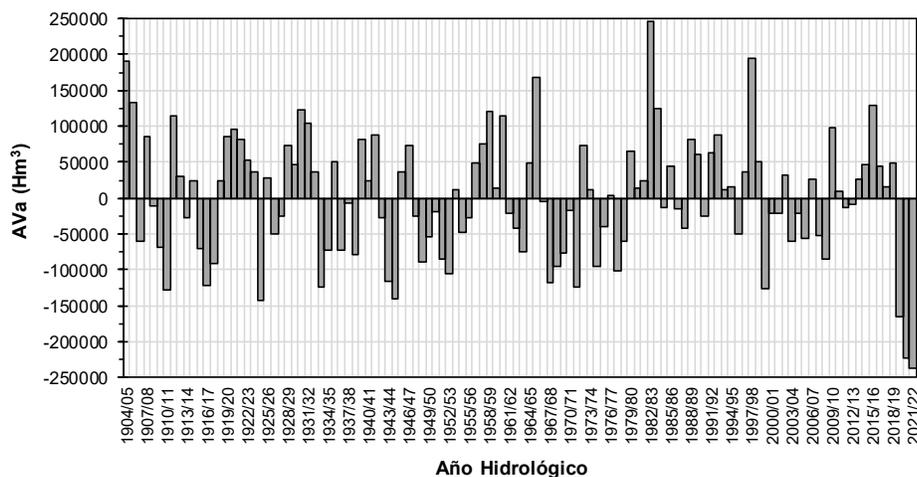


Figura 12. Anomalías de volúmenes de escurrimientos anuales (AVa).

CONSIDERACIONES SOBRE EL CAMBIO OBSERVADO A PARTIR DEL 1971/72

El cambio en el régimen hidrológico del río Paraná a partir del año hidrológico 1971/72, es caracterizado por un incremento del caudal transportado, el cual se explica por diversos factores observados en la cuenca desde inicios de la década del '60; los cuales contribuyeron progresivamente a generar mayores volúmenes de escurrimiento en la cuenca y son consistentes con el cambio observado. Es en ese contexto donde se verifica la drástica disminución del caudal del río, observada durante los tres últimos años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22.

Dentro de los factores que propiciaron el incremento de los caudales del río a partir de 1971/72 se identifican: i) el aumento de lluvias, ii) la deforestación y cambio de uso del suelo y iii) la construcción de presas para aprovechamientos hidroeléctricos.

Aumento de lluvias en la región

Las tendencias de incremento de las precipitaciones en esta región han estado entre las más grandes observadas a lo largo del siglo XX (Cavalcanti et al., 2015). Desde la década de 1970 se ha observado un aumento de las precipitaciones, particularmente en primavera-verano (Haylock et al., 2006; Jacques-Coper y Garreaud, 2015).

Las tendencias positivas de precipitación sobre la cuenca del Plata en la segunda mitad del siglo XX han sido analizadas por varios investigadores (Liebman et al., 2004; Boulanger et al., 2005; Berbery et al., 2006; Seager et al., 2010). El mayor aumento del número de precipitaciones extremas en la región, de noviembre a mayo, fue observado en el sur de Brasil y el noreste de Argentina (Berbery et al., 2006).

Liebmann et al. (2004) identificaron tendencias estacionales lineales de precipitación desde el centro de América del Sur durante 1976-99 y mostraron que la mayor tendencia positiva ocurrió al sur de los 20°S durante enero-marzo y se focalizó en el sur de Brasil; mientras que, de 1948 a 1975 la tendencia también es positiva, pero con menos de la mitad de la pendiente. La tendencia se debe a un aumento en el porcentaje de días lluviosos y un aumento en el promedio de días lluviosos.

Una mirada más amplia sobre los cambios de precipitación asociados con la transición climática de la década de 1970 fue proporcionada por Carvalho et al. (2011), quien estudió el Sistema de circulación Atmosférica del Monzón Sudamericano (SAMS) y documentó una transición hacia un inicio más temprano y una finalización

más tardía del mismo a partir del 1971-1972, es decir, el SAMS experimentó una mayor duración a partir de inicios de la década del '70.

Deforestación y cambio de uso del suelo

La cobertura vegetal representada por los bosques constituye el primer nivel de almacenamiento transitorio debido a la intercepción del follaje, la cual propicia una disminución del volumen de lluvia que alcanza directamente el terreno. Además, la vegetación y la biomasa que existen debajo de los bosques reducen la velocidad del escurrimiento superficial y favorecen la infiltración de la lluvia que alcanza el terreno, disminuyendo el aporte de escurrimiento superficial. Por otra parte, este aumento de infiltración, genera agua disponible en el perfil de suelo, la cual posteriormente retorna a la atmósfera vía la evapotranspiración y parte puede recargar eventualmente el almacenamiento subterráneo. Por lo tanto, la destrucción de cobertura vegetal en general, induce un aumento del escurrimiento superficial y de los caudales pico, una disminución de la evapotranspiración y de los caudales de base aportados por el almacenamiento subterráneo. Este proceso de alteración del ciclo hidrológico puede comprobarse en la cuenca del río Paraná.

Algunos estudios hidrológicos de transformación lluvia-caudal, realizados a escala de la Cuenca del Plata completa, han puesto en evidencia que, en la generación de escurrimiento, las forzantes climáticas son dominantes en relación a los cambios localizados de uso de suelo (Collischonn et al., 2001; Tucci, 2003). A escala de las subcuencas, tanto el clima como también el cambio de uso del suelo tienen efectos sobre la respuesta hidrológica de las cuencas (Saurral et al., 2008). Los estudios realizados en la cuenca alta del río Grande en Brasil, mostraron que la conversión de bosques en pasturas generó un aumento de la escorrentía total y del caudal máximo, y una disminución del caudal base y de la evapotranspiración (Oliveira et al., 2018).

En el caso de la cuenca del Paraná, este proceso de destrucción de cobertura vegetal (deforestación, desmonte, etc.) se ha realizado en zonas de alta sensibilidad para la respuesta hidrológica de la cuenca, como es la zona del Bosque Atlántico del Alto Paraná (BAAP), cuya superficie original de 471204 km² (casi la mitad del área de la cuenca del Alto Paraná con cierre en Corrientes), se extiende desde las laderas occidentales de la Serra do Mar en Brasil hasta el Este de Paraguay y la provincia de Misiones en Argentina (Figura 13).

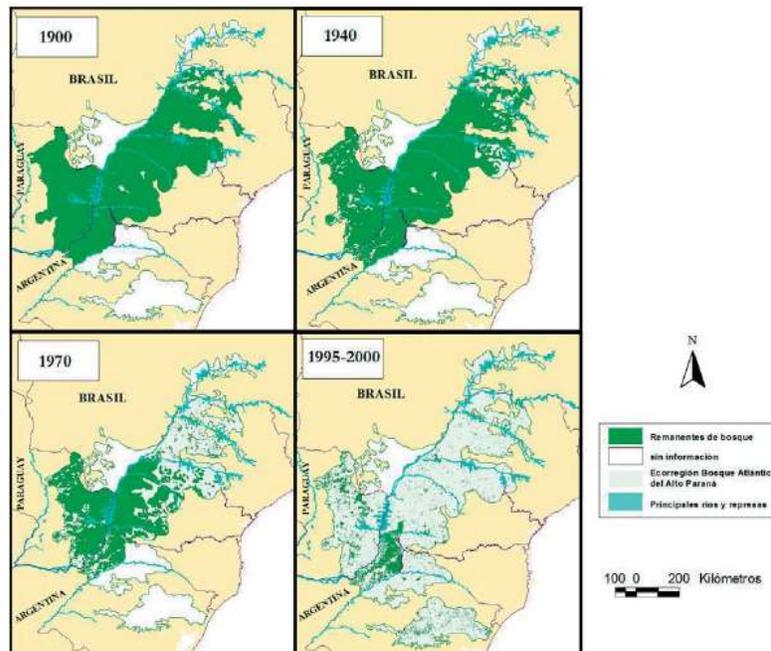


Figura 13. Deforestación del Bosque Atlántico del Alto Paraná (Di Bitetti et al., 2003).

El BAAP ha sufrido una deforestación muy importante, comenzando en los '60 en Brasil y en los '80 en Paraguay. Se estima un 92.2% de pérdida del Bosque Atlántico del Alto Paraná, acelerada a partir de la mitad de la década del '60. De los 471204 km², solo queda actualmente un 7.8% de la cobertura boscosa original aproximadamente, es decir, 36754 km²; tal como se observa en la Figura 13 (Di Bitetti et al., 2003).

La deforestación del BAAP implicó, además, un cambio de uso de suelo con fines de agricultura, ganadería, minería y consolidación de asentamientos urbanos; se estima que 25 millones de personas ocupan actualmente el área original del BAAP (Di Bitetti et al., 2003). Lo anteriormente descrito, explica en buena medida el aumento del volumen de escurrimiento en la cuenca y el consiguiente incremento del caudal en el río Paraná, observado a partir de 1971/72.

Por otra parte, la alta sensibilidad a la respuesta hidrológica se debe a la magnitud de las lluvias que se verifican en esa región (lluvias medias anuales superiores a los 1500 mm) y a la importante red hidrográfica del río Alto Paraná que drena dicha zona.

Construcción de presas en la cuenca alta

Hay más de 63 presas con fines de generación hidroeléctrica, construidas sustancialmente en la cuenca del río Alto Paraná en Brasil (Naumann et al., 2021). En la Figura 14 se observan los desarrollos hidroeléctricos operativos, en construcción y proyectados, etc., en la cuenca del Alto Paraná en Brasil (Stevaux et al., 2007).

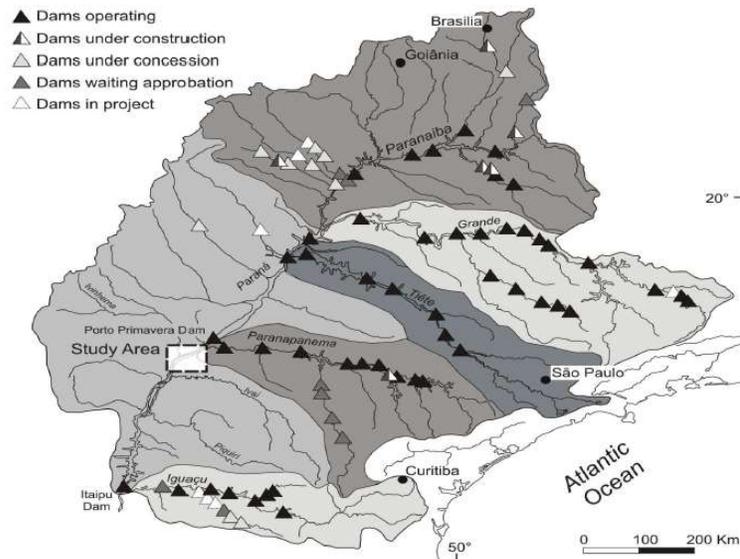


Figura 14. Presas en la cuenca del río Alto Paraná en Brasil (Stevaux et al., 2007).

Es necesario aclarar que, las presas solo regulan el caudal y, durante los períodos de lluvias muy por debajo de las normales en la cuenca, contribuyen (con un margen de operación limitado) a mitigar fundamentalmente el impacto de las bajantes; manteniendo los caudales mínimos más elevados de los que se producirían sin la presa. Esto es debido al turbinado continuo para generación de energía y a la posibilidad de realizar erogaciones controladas de cierta parte del volumen almacenado en el embalse.

En estas bajantes pronunciadas se observan claramente los aumentos de caudal aguas abajo (sobre todo en 2020 y 2021), como consecuencia de las erogaciones controladas de las presas de Itaipú y Yacyretá, lo cual ayudó a paliar, en cierta medida, los problemas derivados de la disminución del caudal en los ríos.

Por otra parte, las presas contribuyen en menor proporción a atenuar los caudales máximos en las crecientes, dado que el des-almacenamiento se considera como una pérdida económica. Debe quedar claro que, las presas para aprovechamientos con fines de generación hidroeléctrica, pueden ser responsables de una larga lista de impactos y daños ambientales, pero en la regulación de los caudales hacia aguas abajo juegan un papel favorable para evitar la severidad adicional que producen las bajantes en los ríos.

En particular, en el análisis realizado en este estudio se observa que el incremento de los caudales medios-bajos es más significativo que el incremento de los caudales altos, tal como queda evidenciado a partir de las curvas de duración de caudales medios diarios y de los hidrogramas medios anuales para las dos sub-series.

BAJANTES 2019/20, 2020/21, 2021/22 Y SEQUÍA METEOROLÓGICA PERSISTENTE

La deforestación realizada del BAAP y el cambio de uso del suelo, contribuyeron a generar mayores volúmenes de escurrimiento en los últimos 51 años, tal como ha sido determinado a partir del análisis de la evolución de los caudales del río Paraná. Dichos cambios en la cuenca subsisten en la actualidad. Por otra parte, las presas, que están construidas y siguen operativas, continúan regulando los caudales y, mediante erogaciones controladas han ayudado mitigar parcialmente el efecto de las bajantes. Por tales motivos, la drástica disminución de los caudales del río Paraná, observada en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22; se relaciona fundamentalmente a lluvias anuales muy por debajo de las consideradas normales en el periodo de tiempo analizado en este estudio.

En efecto, la escasez de lluvias y consecuente sequía meteorológica comenzó a mediados del año 2019, afectando en primer lugar la parte norte de la cuenca, para luego extenderse espacialmente hasta cubrir toda la superficie de la cuenca.

Debido a su persistencia, la sequía meteorológica (déficit de precipitaciones) se propagó a través del ciclo hidrológico, afectando a la humedad del suelo, los caudales y niveles hidrométricos en los ríos, los almacenamientos de aguas superficiales (lagunas, humedales, etc.), los almacenamientos de aguas subterráneas (acuíferos) y la vegetación (Global Drought Observatory [GDO], 2021; World Meteorological Organization [WMO], 2021; Naumann et al., 2021, 2022).

De acuerdo al informe de pronóstico climático realizado por el Instituto Nacional de Meteorología de Brasil en el 2021 (INMET, 2021); las anomalías de lluvias anuales en la cuenca del río Alto Paraná en Brasil, fueron de -200 mm (2019), - 360 mm (2020) y -390 mm (2021).

Según Marengo et al. (2021a), la escasez de lluvias durante los veranos de 2019 y 2020 se debió a la reducción del transporte de aire cálido y húmedo desde la Amazonía hacia el Pantanal, durante el pico de la temporada del Monzón Sudamericano. Esto llevó a prolongadas condiciones de sequía extrema en toda la región. En particular, la sequía en la región del Pantanal puede ser considerada como la mayor en los últimos 50 años (Marengo et al., 2021a).

Por otra parte, las altas temperaturas generaron olas de calor sostenidas, acentuando los efectos adversos de la sequía, e impactando tanto en el ciclo hidrológico como en la salud de los habitantes de la región (Marengo et al., 2021b). Desde el punto de vista meteorológico, la sequía en la cuenca del Paraná puede ser tipificada como “muy severa”, cercana a “excepcional” y ubicada entre las cinco mayores sequías observadas desde el año 1950 (Naumann et al., 2021, 2022).

En la Figura 15 se muestra el Índice de Precipitación Estandarizado-9 meses, para los años 2019, 2020, 2021 y 2022, donde se observan condiciones “extremadamente secas” y “severamente secas” especialmente a partir del 2020 y alcanzando su máxima extensión superficial de condiciones extremadamente secas, principalmente en las cuencas de los ríos Paraguay y Alto Paraná, en el año 2021 (Naumann et al., 2022).

Dada la duración y severidad de la sequía meteorológica, que se propagó por los diferentes subsistemas del ciclo hidrológico, la misma ha tenido consecuencias socio-ambientales considerables y ha generado (Naumann et al., 2021, 2022):

- i) Problemas en el suministro de agua potable a poblaciones, debido sustancialmente a la posición altimétrica de las obras de toma sobre el río Paraná, las cuales han sido diseñadas para niveles hidrométricos mínimos del río más elevados. No es un problema de cantidad de caudal disponible, ya que con solo 5 m³/s (~0.071% de 7000 m³/s mínimo observado en las ultimas bajantes) se pueden abastecer 1.73 millones de habitantes con una dotación de 250 l/hab. día;
- ii) Restricciones considerables para el transporte fluvial de cargas en los ríos Paraguay y Paraná. En la actualidad esto tiene mucho más impacto que en el pasado, debido a la evolución de las flotas de buques de carga hacia mayores dimensiones (eslora y manga) y calado, con la consecuente mayor capacidad de carga;
- iii) Reducción considerable de generación de energía hidroeléctrica, con el consecuente aumento del costo de la electricidad, principalmente en Brasil, que es altamente dependiente de esa fuente de energía;
- iv) Pérdidas en pesquerías artesanales;
- v) Disminución de rendimientos agrícolas;
- vi) Afectación de la ganadería;
- vii) Aumento de incendios forestales en las cuencas de los ríos Amazonas y Paraná;
- viii) Impactos negativos sobre los ecosistemas y la biodiversidad de los humedales, especialmente en el Pantanal, los Esteros del Iberá y el valle aluvial del río Paraná medio e inferior.

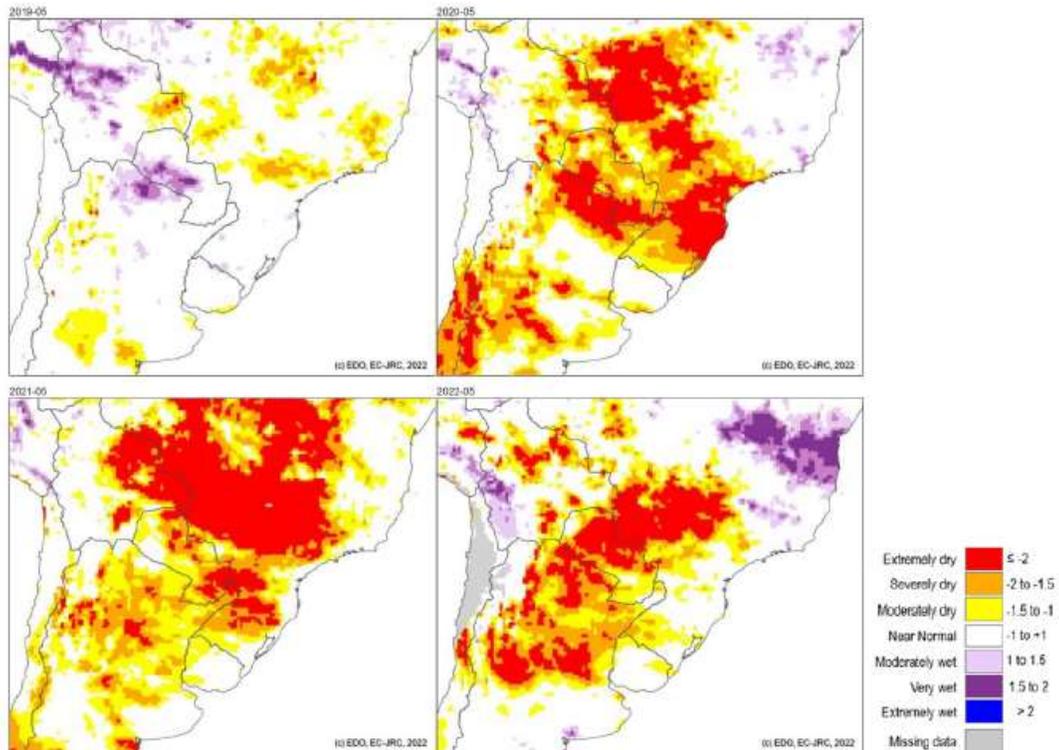


Figura 15. Índice de Precipitación Estandarizado-9 meses (IPS-9): 2019 (sup. izq.), 2020 (sup. der.), 2021 (inf. izq.) y 2022 (inf. der.), (Naumann et al., 2022).

El Monzón Sudamericano y las lluvias en la cuenca del río Paraná

El sistema de circulación atmosférica del Monzón Sudamericano (SAMS-South American Monsoon System en inglés) gobierna el régimen de precipitaciones en el continente sudamericano (Mechoso et al., 2005; Grimm et al., 2005; Misra, 2008; Marengo et al., 2010). La humedad que se evapora del Atlántico tropical, preponderantemente durante el verano austral, ingresa al noreste de la Amazonía a través de los vientos alisios. A medida que avanza por el bosque, se producen lluvias importantes, y a su vez, parte de las mismas son de vueltas a la atmósfera en forma de vapor por medio de la evapotranspiración generada por el bosque amazónico, en lo que se denomina “reciclado de precipitaciones” (Marengo, 2006; Machado Rocha et al., 2018). Un alto volumen de humedad llega al suroeste de la Amazonía y se encuentra con la Cordillera de los Andes, desde donde se genera una corriente atmosférica de chorro de bajo nivel-SALLJ (South American Lower Level Jet en inglés) que se desarrolla a 1-3 km de la superficie terrestre, la cual se redirige hacia el sureste de Brasil, extendiéndose por todo el continente y transportando el remanente de humedad proveniente de la evaporación del Atlántico y la evapotranspiración del bosque Amazónico (Marengo et al., 2009, 2010; Machado Rocha et al., 2018).

A escala regional, la Amazonía es una fuente importante de humedad que contribuye al régimen de precipitaciones en otras regiones de América del Sur (Marengo, 2006; Misra, 2008; Machado Rocha et al., 2018). Es decir, existe una relación estrecha entre las lluvias en la cuenca del río Paraná y la corriente atmosférica SALLJ al este de los Andes, alimentada por la evapotranspiración de la cuenca del Amazonas que ingresa a la cuenca del Paraná. Por lo cual, una alteración de la evapotranspiración en el Amazonas, como por ej., la reducción de la misma debido a la deforestación, los incendios (gran cantidad de focos en 2020-2022), etc.; puede disminuir notablemente el vapor de agua en la corriente atmosférica de chorro de bajo nivel SALLJ y afectar el monto de precipitaciones, tal como señalado por Marengo et al. (2021a).

Esto sumado a la variabilidad climática que impone el fenómeno de El Niño Oscilación Sur (ENOS), que, durante años Niñas (anomalías negativas de la temperatura del Océano Pacífico Ecuatorial) el SAMS se debilita y consecuentemente también la SALLJ. Viceversa, durante fases Niño (anomalías positivas de la temperatura del Océano Pacífico Ecuatorial), SAMS y SALLJ se refuerzan (Misra et al., 2002; Berbery y Barros, 2002; Silva et al., 2009; Santos y Reboita, 2018). En los años 2020-2022 se verificaron anomalías negativas de temperaturas superficiales del Océano Pacífico tropical (región 3-4), las cuales se correspondieron con un evento de Niña del ENOS (Becker, 14 de julio de 2022).

Las simulaciones numéricas con modelos climáticos acoplados, realizadas por Nobre et al. (2009), mostraron reducciones de lluvia de hasta el 60% debido a la deforestación en la Amazonía, y respuestas atmosféricas remotas significativas a los escenarios de deforestación, sugiriendo una mayor actividad de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) sobre el Pacífico, y una retroalimentación positiva que contribuye a la reducción adicional de precipitaciones sobre el Amazonas.

La deforestación en la Amazonia se viene realizando en forma sistemática y actualmente alcanza un 19% del área total de 5.3 millones de km². Algunas investigaciones sostienen que sobrepasado el umbral del 25% de deforestación del área del bosque Amazónico, en conjunción con el calentamiento global propiciado por las emisiones de CO₂; se puede experimentar una metamorfosis climática, induciendo un cambio de selva tropical a sabana desértica (Nobre et al., 2009; Nobre y Borma, 2009).

En efecto, las simulaciones con modelos climáticos muestran el riesgo de un reemplazo abrupto e irreversible de los bosques amazónicos por vegetación de tipo sabana, con posibles impactos a gran escala sobre el clima, la biodiversidad y las personas (Betts et al., 2004; Cox et al., 2004; Salazar et al., 2007; Sampaio et al., 2007; Sitch et al., 2008), en un proceso denominado "muerte regresiva" de la Amazonía. Después de alcanzar un "punto de inflexión" en el clima (concentración de CO₂, temperatura del aire), el bosque deja de comportarse como un sumidero de carbono y se convierte en una fuente de carbono. Tras lo cual, el bosque entra en un estado de colapso y luego es reemplazado por vegetación de tipo sabana ("sabanización" de la región Amazónica). Por lo tanto, la resiliencia del bosque a las presiones combinadas de la deforestación y el cambio climático es motivo de gran preocupación, ya que algunos de los principales modelos climáticos

predicen una sequía severa de la Amazonía en el siglo XXI (Betts et al., 2004; Malhi et al., 2008, 2009; Nobre y Borma, 2009).

La probabilidad de que ocurra este escenario de extinción de la selva Amazónica sigue siendo un tema de investigación abierto. El mismo es motivo de preocupación, ya que, de producirse tal escenario, implicaría una verdadera catástrofe ambiental, no solo para la cuenca del río Paraná, sino para el entero continente Sudamericano y con repercusiones en todo el planeta.

CONCLUSIONES

Se realizó el análisis de caudales del río Paraná; a escala temporal diaria, mensual, anual y plurianual, considerando la serie de años hidrológicos 1904/05 – 2021/22. Se observa un claro cambio en el régimen hidrológico del río, a partir del inicio de los años '70, caracterizado por un incremento de los caudales y volúmenes de escurrimiento en la cuenca.

Los caudales medios diarios mínimos anuales eran mucho más frecuentes antes del año hidrológico 1971/72. Antes del 1971/72 el caudal de 9000 m³/s es igualado o superado por defecto cada 1.5 años en promedio; mientras que, después del 1971/72 esto se observa cada 17 años en promedio; con la particularidad que 3 de los 4 valores mínimos de la sub-serie de 51 años se registran en los últimos tres años hidrológicos, es decir, 2019/20 (8360 m³/s), 2020/21 (7230 m³/s) y 2021/22 (6870 m³/s). Cabe señalar que, el caudal medio diario mínimo extremo más severo se produjo en el año hidrológico 1944/45 (5700 m³/s).

Lo contrario ocurre con los caudales medios diarios máximos anuales. Antes de 1971/72 el caudal de 25000 m³/s es igualado o superado por exceso cada 33.5 años en promedio; mientras que, después del 1971/72 esto se observa cada 5.1 años en promedio.

El hidrograma medio anual correspondiente a la sub-serie 1971/72-2021/22, formado por los caudales módulos mensuales QMm de la sub-serie, es definitivamente mayor y muestra menor amplitud (diferencia entre el caudal máximo y mínimo) que el de 1904/05-1970/71. El caudal módulo anual QMa es de 14168 m³/s (1904/05-1970/71) y 17493 m³/s (1971/72-2021/22), es decir, se observa un incremento de 3325 m³/s en el QMa a partir del año 1971/72.

Tal cambio en el régimen hidrológico del río se explica por diversos factores observados en la cuenca a partir de la década del '60, como los aumentos de lluvias a escala regional y la deforestación del BAAP con el consiguiente cambio del uso del suelo; que contribuyeron a generar mayores escurrimientos en la cuenca y son consistentes con el cambio observado. Por otra parte, las represas hidroeléctricas operativas en la cuenca del Alto Paraná, solo regulan el caudal, aumentando principalmente los caudales mínimos en años de lluvias muy por debajo de las medias anuales.

Las bajantes observadas en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22 se dan en ese contexto de incremento de caudales a partir de inicios de los años '70. Tales bajantes presentan anomalías negativas de caudal medio anual iguales a -5253 m³/s (2019/20), -7033m³/s (2020/21) y -7521m³/s (2021/22), las cuales representan las mayores anomalías negativas de caudales medios anuales observadas del río Paraná en toda la historia con registros aquí considerada. Las mismas se asocian a volúmenes de escurrimiento en la cuenca, similares a los observados en las bajantes ocurridas antes del 1971/72 en años “secos”.

Dado que los factores que contribuyeron a generar mayores volúmenes de escurrimiento en los últimos 51 años siguen actuando, o sea, la deforestación del BAAP y el cambio de uso de suelo son una realidad; la disminución observada de los caudales en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22, se relaciona con la sequía meteorológica persistente que afectó a la cuenca.

La sequía comenzó a mediados de 2019 y se propagó por el ciclo hidrológico afectando la humedad del suelo y la vegetación, los almacenamientos de aguas superficiales, los almacenamientos de aguas subterráneas, los

caudales y niveles hidrométricos en los ríos. La escasez de lluvias se debió a la reducción del transporte de aire cálido y húmedo desde la Amazonía, durante el pico de la temporada del Monzón Sudamericano. Esto llevó a prolongadas condiciones de sequía extrema en toda la región.

Debido a la importancia ambiental, cultural y socio-económica de la cuenca del río Paraná para todos los habitantes de los países que la integran, estas anomalías negativas de caudales observadas en las últimas bajantes, encienden una alarma e introducen una incertidumbre muy fuerte sobre la futura evolución de los volúmenes de escurrimiento, caudales y niveles hidrométricos en el sistema fluvial del río Paraná.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la UNR por el apoyo brindado a través de los proyectos: PID 80020190300073UR y PID 80020190300002UR.

REFERENCIAS

- Becker, E. (14 de julio de 2022). July 2022 La Niña update: comic timing. *ENSO Blog* en NOAA Climate.gov. <https://www.climate.gov/news-features/blogs/july-2022-la-niña-update-comic-timing>
- Berberly, E. H. y Barros, V. R. (2002). The hydrological cycle of the La Plata Basin in South America. *Journal of Hydrometrology* 3, 630–645.
- Berberly, E. H., Doyle, M. y Barros, V. R. (2006). Tendencias regionales en la precipitación. En: Barros, V., Clarke, R. y Silva Dias, P. (Eds.), *El Cambio climático en la cuenca del Plata*. Buenos Aires, CIMA/CONICET, pp. 67–79.
- Betts, R., Cox, P. M., Collins, M., Arris, P. P., Huntingford, C. y Jones, C. D. (2004). The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest die back under global climate warming. *Theoretical and Applied Climatology* 78, 157–166.
- Boulanger, J. P., Leloup, J., Penalba, O. C., Rusticucci, M. M., Lafon, F. y Vargas, W. M. (2005). Observed precipitation in the Paraná-Plata hydrological basin: long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections. *Climate Dynamics* 24, 393–413.
- Carvalho, L. M. V., Jones, C., Silva, A. E., Liebmann, B. y Silva Dias, P. L. (2011). The South American Monsoon System and the 1970s climate transition. *Int. J. Climatol.* 31, 1248–1256. DOI:10.1002/joc.2147.
- Cavalcanti, I. F. A., Carril, A. F., Penalba, O. C., Grimm, A. M., Menéndez, C. G., Sanchez, E., Cherchi, A., Sörensson, A., Robledo, F., Rivera, J., Pántano, V., Bettolli, L. M., Zaninelli, P., Zamboni, L., Tedeschi, R. G., Dominguez, M., Ruscica, R. y Flach, R. (2015). Precipitation extremes over La Plata Basin—Review and new results from observations and climate simulations. *Journal of Hydrology* 523, 211–230.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill Interamericana S.A., Bogotá, Colombia. ISBN 958-600-171-7.
- Collischonn, W., Tucci, C. E. M. y Clarke, R. T. (2001). Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? *Journal of Hydrology* 245, 218–238.
- Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata. (2017). *Ecosistemas acuáticos en la Cuenca del Plata*. Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata – Ira Ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Libro digital, PDF. https://cicplata.org/wp-content/uploads/2017/04/ecosistemas_acuaticos_en_la_cuenca_del_plata_20170424.pdf
- Cox, P., Betts, R., Collins, M., Harris, P., Huntingford, C. y Jones, C. (2004). Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology* 78, 137–156.
- Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur. (s.f.). *Sistemas de Información sobre Sequías para el Sur de Sudamérica*. Organización Meteorológica Mundial. <https://www.crc-sas.org/es/>
- Di Bitetti, M. S., Placci, G. y Dietz, L. A. (2003). *Una Visión de Biodiversidad para la Ecorregión del Bosque Atlántico del Alto Paraná: Diseño de un Paisaje para la Conservación de la Biodiversidad y Prioridades para las Acciones de Conservación*. Washington, D.C., World Wildlife Fund.

- Dirección Nacional de Vías Navegables-Distrito Paraná Inferior.(2022). *Datos de niveles hidrométricos diarios del río Paraná en Puerto San Martín (km 448)*. Dirección Nacional de Vías Navegables-Distrito Paraná Inferior, Argentina.
- Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. (1989). *Estudio hidráulico y morfológico del tramo km 410-440 del Río Paraná*. Departamento de Hidráulica e Ing. Sanitaria. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) – Universidad Nacional de Rosario.
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. (2004). *Estudios Hidráulicos y Morfológicos Zona Isla de La Invernada, Río Paraná*. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) – Universidad Nacional del Litoral, Diciembre 2004.
- Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. (2006). *Estudios Complementarios Hidráulicos y Morfológicos de la Zona de la Isla de La Invernada*. Informe final. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) – Universidad Nacional del Litoral, Julio 2006.
- Global Drought Observatory. (2021). *GDO Analytical report. Drought in centre-south Brazil – June 2021*. JRC Global Drought Observatory (GDO) of the Copernicus Emergency Management Service (CEMS). <https://edo.jrc.ec.europa.eu/gdo/php/index.php?id=2050>
- González, M. P. (2023). *Sequía en Brasil*. CRC-SAS. Centro regional del Clima para el Sur de América del Sur. SISSA-Sistema de Información de Sequías para el Sur de Sudamérica. <https://sissa.crc-sas.org>.
- Grimm, A. M., Vera, C. y Mechoso, R. (2005). The South American Monsoon System. En: *The Global Monsoon System: Research and Forecast*, Chang, C. P., Wang, B. y Lau, N. C. G. (eds), WMO/TD 1266 – TMRP: pp. 542.
- Haylock, M. R., Peterson, T. C., Alves, L. M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y. M., T., Baez, J., Barros, V. R., Berlato, M. A., Bidegain, M., Coronel, G., Corradi, V., Garcia, V. J., Grimm, A. M., Karoly, D., Marengo, J. A., Marino, M. B., Moncunill, D. F., Nechet, D., Quintana, J., Rebello, E., Rusticucci, M., Santos, J. L., Trebejo, I. y Vincent, L. A. (2006). Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate* 19, 1490–1512.
- Instituto Nacional de Meteorología de Brasil (2021). *Prognóstico climático 2021. Anexo I. Variação climática da chuva na bacia do Rio Paraná – Crise Hídrica*. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Brasil.
- Jacques-Coper, M. y Garreaud, R. D. (2015). Characterization of the 1970s climate shift in South America. *International Journal of Climatology* 35, 2164–2179.
- Liebmann, B., Vera, C. S., Carvalho, L. M. V., Camilloni, I., Hoerling, M. P., Barros, V. R., Baez, J. y Bidegain, M. (2004). An observed trend in central South American precipitation. *Journal of Climate* 17, 4357–4367.
- Machado Rocha, V., Teixeira da Silva, P. R., Brito Gomes, W., Alves Vergasta, L. y Jardine, A. (2018). Precipitation Recycling in the Amazon Basin: A Study Using the ECMWF Era-Interim Reanalysis Dataset. *Revista do Departamento de Geografia* 35, 71-82. Universidade de São Paulo. Brasil.
- Malhi, Y., Aragão, L., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R., Zelazowski, P., Sitch, S., McSweeney, C. y Meir, P. (2009). Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest. *PNAS* 106(49): pp. 20610–20615, DOI:10.1073/pnas.0804619106
- Malhi, Y., Roberts, J. T. R., Betts, R. A., Killeen, T. J., Li, W. y Nobre, C. A. (2008). Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science*, 319, 169–172, DOI:10.1126/science.1146961.
- Marengo, J. A., Ambrizzi, T. y Soares, W. R. (2009). Jato de BaixosNiveisao longo dos Andes. En: Cavalcanti, I. F. A.; Ferreira, N. J.; Silva, M. G. A. J. da; Dias, M. A. F. da Silva (Orgs) *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, pp. 169-180.
- Marengo, J. A., Liebmann, B., Grimm, A. M., Misra, V., Silva Dias, P. L., Cavalcanti I. F. A., Carvalho, L. M. V., Berbery, E. H., Ambrizzi T., Vera, C. S., Saulo, A. C., Noguez-Paegle, J., Zipser, E., Seth A. y Alves, L. M. (2010). Review recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology* 32; 1-21.
- Marengo, J. A. (2006). On the Hydrological Cycle of the Amazon Basin: A historical review and current State-of-the-art. *Revista Brasileira de Meteorologia* 21, 3a, 1-19.
- Marengo, J. A., Cunha, A. P., Cuartas, L. A., Deusdará Leal, K. R., Broedel, E., Seluchi, M. E., Michelin, C. M., De Praga Baião, C. F., Chuchón Ángulo, E. y Almeida, E. K. (2021a). Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Frontiers in Water* 3, 13.

- Marengo, J. A., Ambrizzi, T., Barreto, N., Cunha, A. P., Ramos, A. M., Skansi, M., Carpio, J. M. y Salinas, R. (2021b). The Heat Wave of October 2020 in Central South America. *International Journal of Climatology* 42, 2281–2298 (2022).
- Mechoso, C. R., Robertson, A. W., Ropelewsky, C. F. y Grimm, A. M. (2005). The American monsoon systems: An introduction. En: Chang, C. P.; Wang, B.; Lau, N. C. G. (Eds.). *The global monsoon system: research and forecast*. Ginebra: World Meteorological Organization, WMO/TD, n. 1266 (TMRP Rep. n. 70), pp. 197-206.
- Misra, V. (2008). Coupled air, sea, and land interactions of the South American Monsoon. *Journal of Climate* 21: 6389–6403.
- Misra, V., Dirmeyer, P. A., Kirtman, B. P., Juang, H. M. y Kanamitsu, M. (2002). Regional simulation of inter-annual variability over South America. *Journal of Geophysical Research* 107, 8036, DOI:10.1029/2001JD900216.
- Naumann, G., Podesta, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera, D., Arias Muñoz, C., Barbosa, P., Cammalleri, C., Chamorro, L., Cuartas, A., de Jager, A., Escobar, C., Hidalgo, C., Leal de Moraes, O., McCormick, N., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., Seluchi, M., Skansi, M. M., Spinoni, J. y Toreti, A. (2021). *The 2019-2021 extreme drought episode in La Plata Basin*. EUR 30833 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76-41898-6 (online), DOI:10.2760/773 (online), JRC126508.
- Naumann, G., Podesta, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera, D., Acosta Navarro, J., Arias Muñoz, C., Barbosa, P., Cammalleri, C., Cuartas, A., de Estrada, M., de Felice, M., de Jager, A., Escobar, C., Fioravanti, G., Giordano Harst Essenfelder, A. L., Hidalgo, C., Leal de Moraes, O., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., Osman, M., Rossi, L., Seluchi, M., de los Milagros Skansi, M., Spennemann, P., Spinoni, J., Toreti, A y Vera, C. (2022). *Extreme and long-term drought in the La Plata Basin: event evolution and impact assessment until September 2022*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022, DOI:10.2760/62557, JRC132245.
- Nobre, C. A. y Borma, L. S. (2009). Tipping points for the Amazon forest. *Current Opinion in Environment Sustainability* 1, 28–36.
- Nobre, P., Malagutti, M., Urbano, D. F., de Almeida, R. A. F. y Giarolla, E. (2009). Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation. *Journal of Climate* 22, 5686–5697.
- Oliveira, V. A., de Mello, C. R., de Viola, M. R. y Srinivasan, R. (2018). Land-use change impacts on the hydrology of the upper Grande river basin, Brazil. *Cerne* 24, 334–343.
- Salazar, L. F., Nobre, C. A. y Oyama, M. D. (2007). Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters* 34: L09708.
- Sampaio, G., Nobre, C. A., Costa, M. H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B. S. y Cardoso, M. (2007). Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters* 34: L17709. DOI:10.1029/2007GL030612.
- Santos, D. F. y dos Reboita, M. S. (2018). Jatos de baixos níveis a leste dos Andes: Comparação entre duasreanálises. *Revista Brasileira de Climatologia*, 22, 423-445.
- Saurral, R. I., Barros V. R. y Lettenmaier, D. P. (2008). Land use impact on the Uruguay River discharge. *Geophysical Research Letters* 35, L12401. DOI:10.1029/2008GL033707
- Seager, R., Naik, N., Baethgen, W., Robertson, A., Kushnir, Y., Nakamura, J. y Jurburg, S. (2010). Tropical Oceanic Causes of Interannual to Multidecadal Precipitation Variability in Southeast South America over the Past Century. *Journal of Climate* 23, 5517–5539. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3578.1>
- Silva, G. A. M., Ambrizzi, T. y Marengo, J. A. (2009). Observational evidences on the modulation of the South American Low Level Jet east of the Andes according the ENSO variability. *Annales Geophysicae*, 27, 645–657, 2009.
- Sistema Nacional de Información Hídrica. (s.f.). *Base de Datos del Sistema Nacional de Información Hídrica, Secretaría de Infraestructura y Política Hídrica, Ministerio de Obras Públicas*. <https://snih.hidricosargentina.gob.ar>
- Sitch, S., Huntingford, C., Gedney, N., Levy, P. E., Lomas, M., Piao, S. L., Betts, R., Ciais, P., Cox, P., Friedlingstein, P., Jones, C. D., Prentice, I. C. y Woodward, F. I. (2008). Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs). *Global Change Biology* 14, 2015–2039.

- Stevaux, J. C., Martins, D. P. y Meurer, M. (2007). *Changes in the Paraná River Channel introduced by the Porto Primavera Dam, Brazil*. Workshop on Morphodynamic Processes in Large Lowland Rivers. 12-16 Nov. 2007, Santa Fe, Argentina.
- Tucci, C. E. (2003). Flood flow forecasting. *Bulletin of the World Meteorological Organization* 52, 46–52.
- World Meteorological Organization. (2021). *State of the Climate in Latin America and the Caribbean 2020*. World Meteorological Organization WMO-No. 1272.

Trabajo recibido el 11/08/2023 y aceptado por el Consejo Editorial para su publicación el 27/09/2023.

COMO CITAR

Basile, P. A. y Riccardi, G. A. (2023). Análisis de caudales del río Paraná y contextualización de las bajantes en los años hidrológicos 2019/20, 2020/21 y 2021/22. *Cuadernos del CURIHAM, Edición Especial (2023): Bajante del río Paraná*. e01. <https://doi.org/10.35305/curiham.ed23.e01>

ROLES DE AUTORÍA

Nombre y Apellido de Autores	Colaboración Académica													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Pedro Abel Basile	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gerardo Adrián Riccardi	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

1. Administración del proyecto; 2. Adquisición de fondos; 3. Análisis formal; 4. Conceptualización; 5. Curaduría de datos; 6. Escritura - revisión y edición; 7. Investigación; 8. Metodología; 9. Recursos; 10. Redacción - borrador original; 11. Software; 12. Supervisión; 13. Validación; 14. Visualización.

LICENCIA

Este es un artículo de acceso abierto bajo licencia: Creative Commons Atribución -No Comercial -Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>)



Este trabajo se enmarca dentro de la EDICIÓN ESPECIAL (2023): Bajante del río Paraná de la revista Cuadernos del CURIHAM