

# Variabilidad climática natural y su impacto en el río Paraná y Paraguay

*Micaela Suriano*<sup>(1)</sup>, *Rafael Seoane*<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Nacional del Agua (INA), Argentina.

<sup>(2)</sup> INA - Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FIUBA) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

E-mail: msuriano@ina.gob.ar

**RESUMEN:** Este trabajo tiene como objetivo analizar el impacto conjunto de dos indicadores de la variabilidad climática natural sobre series observadas de caudales en escala trimestral y mensual. Con un enfoque estadístico se estudia la magnitud de la asociación entre El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y sus efectos sobre el caudal promedio trimestral y mensual, en el río Paraná y en el Paraguay. Si bien existen estudios que muestran la influencia del fenómeno ENSO para Sudamérica y la Argentina, resulta importante mejorar el conocimiento de su relación con el PDO, debido a que este último responde definiendo propiedades estadísticas diferentes para periodos de los datos hidrológicos del orden de veinte o treinta años. Los resultados muestran que cuando coincide la fase positiva del PDO (PDO+) con El Niño (EN), en el río Paraná y Paraguay, en todos los meses en promedio, hay un incremento de los caudales. Cuando coincide La Niña (LN) con la fase negativa del PDO (PDO-), se observa que los caudales mensuales, en promedio disminuyen. A partir del análisis con el método de Bootstrap, se ve muy diferenciados los intervalos de confianza para el caso que coincide EN con PDO+ con respecto a LN con PDO-. Esto contribuye a un mejor entendimiento del impacto de fenómenos climáticos en los caudales de ríos de nuestro país, lo que permite una interpretación más adecuada de las series hidrológicas históricas y por ende una mejora en el pronóstico y en la planificación del recurso.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han realizado numerosos trabajos que estudian la relación entre los indicadores de la variabilidad climática natural y las variables hidrológicas. El objetivo de este trabajo es realizar un análisis, a través de un enfoque estadístico, del impacto conjunto de dos indicadores: El Niño-Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés) y la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO por sus siglas en inglés) en dos ríos con grandes cuencas en Sudamérica: el río Paraguay y el Paraná.

Resultados previos muestran que la combinación de estos efectos impacta en los caudales promedios trimestrales en algunos ríos de Argentina (Suriano y Seoane, 2016), en este caso se redujo la escala de análisis a mensual, para poder conocer la variación estacional del caudal con más detalle, lo que permitirá relacionar estos resultados con el medio ambiente y la eco-hidrología.

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés), señala que la Oscilación del Sur describe una variación en la presión barométrica del nivel del mar entre las estaciones de observación en Darwin y Tahití, siendo el Índice de Oscilación del Sur (SOI) la diferencia normalizada entre las mismas. El Niño y La Niña son las fases cálidas y frías del ENSO, que pueden cambiar de manera irregular cada dos a siete años.

Por otro lado, el PDO se describe como un patrón más extenso que el ENSO. Las fases extremas de la PDO se clasifican en fases positivo o negativo, según la definición de anomalías. Tiene la particularidad de presentar una oscilación del orden de los veinte o treinta años. Las causas actualmente no se conocen del todo bien, por lo cual no se puede conocer correctamente la previsibilidad potencial de esta oscilación climática. En Sudamérica y la Argentina existen estudios que muestran la influencia del fenómeno ENSO, pero sería útil incrementar el conocimiento de su relación con el PDO, en una escala de tiempo estacional.

El conocimiento del efecto que la superposición de estos dos indicadores de la variabilidad climática natural tiene sobre los caudales, permitirá una mejor planificación del recurso hídrico. Los procesos climatológicos que presentan esta ventana temporal son significativos para los sistemas hídricos con aprovechamientos hidroeléctricos.

## MARCO TEÓRICO

Desde los años 80 se ha avanzado significativamente en la comprensión de la relación entre los indicadores de la variabilidad climática natural y distintas variables, como por ejemplo las hidrológicas. Entre los primeros trabajos, Mantua *et al.* (1997), estudian el impacto del PDO sobre la producción del salmón en el Pacífico Norte que es la zona de mayor actividad del fenómeno.

Luego, Mantua *et al.* (2002), presentan una revisión sobre el PDO, indicando la importancia que tiene estudiar su variabilidad ya que está demostrado que las condiciones climáticas “normales” pueden variar en períodos de tiempo comparables a la vida humana, y las anomalías climáticas pueden persistir una o más décadas, produciendo gran impacto en los ecosistemas y sociedades.

Neal *et al.* (2002) con la información de seis cuencas en el Sureste de Alaska analizan las diferencias en los caudales mensuales y estacionales y consideran las dos fases PDO: período frío (1947-1976) y período cálido (1977-1998). A escala mensual como estacional han encontrado una diferencia significativa entre los distintos períodos.

Andreoli y Kayano (2005) investigaron las anomalías relacionadas con ENSO en las precipitaciones medias mensuales en América del Sur, durante las distintas dos fases del indicador PDO. Los resultados muestran fuertes indicios que la respuesta de los fenómenos ENSO depende de las fases del PDO.

Kayano y Andreoli (2007) concluyen que las diferencias en la magnitud del ENSO están relacionadas con el PDO, el cual actúa potenciando los efectos cuando están en fase.

Silva *et al.* (2011) estudiaron los efectos de El Niño en América del Sur (a través de la precipitación, SST (*Sea Surface Temperature*), entre otros índices) durante las distintas fases del PDO, en particular para el

verano austral entre 1955-1999. Los resultados muestran anomalías positivas de precipitación para la zona Norte del centro de Argentina con períodos de PDO positivos.

Ouyang *et al.* (2014) analizaron el impacto simple y combinado del ENSO y del PDO sobre las precipitaciones y los caudales en cuatro ríos de China (*Songhua, Yellow, Yangtze y Pear*). Los resultados muestran que las precipitaciones y caudales decrecen cuando la fase El Niño (EN) coincide con un PDO cálido, y crecen cuando la fase La Niña (LN) coincide con un PDO frío.

## METODOLOGÍA

La metodología consiste en primer lugar, en calcular el promedio total ( $Q_i$ ) de todos los años para cada mes para poder calcular el residuo estandarizado en porcentaje ( $d_{ij}$ ) de cada mes y de cada año, como la diferencia entre  $Q_{ij}-Q_i$  ( $Q_{ij}$ , siendo  $i$  el mes y  $j$  el año) luego dividido por  $Q_i$  y multiplicado por 100. Entonces, se estratifican los  $d_{ij}$  según si es un año identificado como El Niño (EN), La Niña (LN) o Neutro (N).

Luego se calculan los promedios de los  $d_{ij}$  para los años según: EN, LN o N. Se repite el procedimiento con una segunda estratificación, diferenciando para cada año (además de EN, LN y N) la fase PDO: si es un año PDO positivo (PDO+) o negativo (PDO-). Se utiliza la propuesta de Ouyang *et al.* (2014) y se comparan los caudales cuando ENSO está en fase con PDO.

Con esta metodología se cuantifica la acción de los fenómenos actuando en conjunto, en particular cuando los efectos se potencian. Se aplica la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon, para evaluar la significación de los resultados obtenidos. Esta es una prueba no paramétrica que compara la mediana de dos muestras relacionadas y determinar si existen diferencias entre ellas.

Finalmente, se aplica la técnica Bootstrap de remuestreo, con una simulación de 1000 muestras y un nivel de confianza del 95%, para evaluar los intervalos de confianza de los promedios, estimados con el método  $BC_a$ , utilizando el software R con el paquete “*boot*” (Canty y Ripley, 2015). El método  $BC_a$ , descrito en Efron y Tibshirani (1993), tiene en cuenta el sesgo y la variabilidad de las réplicas de Bootstrap con dos coeficientes llamados de “sesgo” y de “aceleración”.

Luego se repite el procedimiento para cada trimestre, calculado como el promedio de los caudales medios mensuales para cada año ( $Q_{ij}$ , siendo  $i$  el trimestre y  $j$  el año)

**DATOS**

Se analizan los caudales de los ríos: Paraguay (Puerto Pilcomayo), 1910-2002, y Paraná (Corrientes) en Argentina, 1904-2002. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación Argentina (<http://www.hidricosargentina.gov.ar/>).

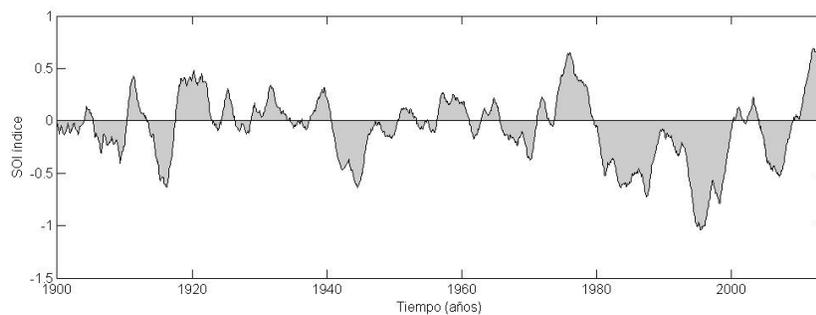
La Tabla 1 muestra las principales características de los sistemas hidrológicos en estudio.

**Tabla 1.-** Principales datos de los sistemas hidrológicos estudiados.

Río	Estación	Área de cuenca (km <sup>2</sup> )	Registro estudiado	Año hidrológico
Paraguay	Puerto Pilcomayo	800000	1910-2002	Septiembre-agosto
Paraná	Corrientes	1950000	1904-2002	Septiembre-agosto

Con la clasificación realizada por el Departamento de Ciencias Atmosféricas, Universidad de Washington (<http://www.atmos.washington.edu/~mantua/TABLES2.html>), y según el criterio que identifica períodos continuos de las distintas fases PDO, se estratifican las muestras (1900-2002) según el fenómeno ENSO y el PDO. Si bien existen registros de caudales hasta la fecha, se limita el análisis hasta el año 2002 debido a que la clasificación utilizada del índice PDO está realizada hasta ese año.

Las figuras 1.a y 1.b muestran a las series temporales (promedio móvil de cinco años) del SOI y del PDO respectivamente.



**Figura 1.a.-** Variación de la serie temporal del Índice de Oscilación del Sur.

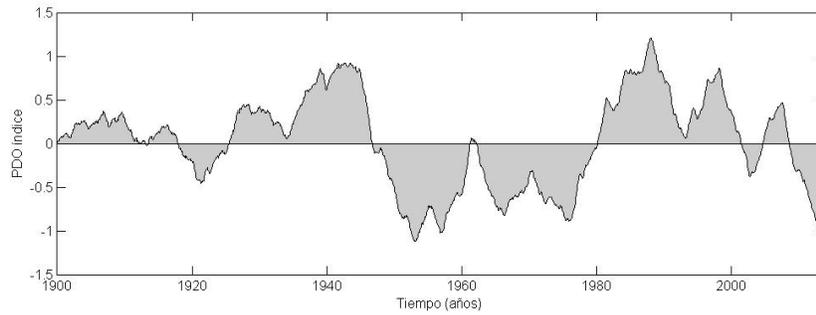


Figura 1.b.- Variación de la serie temporal de la Oscilación Decadal del Pacífico.

## RESULTADOS

Las figuras 2.a, 2.b, muestran para cada río la diferencia porcentual promedio trimestral de los años EN y LN, coincidiendo con PDO positivo (gris oscuro) y negativo (gris claro) respectivamente. Los asteriscos indican la significancia según la prueba Wilcoxon siendo \*\*\* menor que 0.01, \*\*menor que 0.05 y \* menor que 0.1.

En el río Paraguay (Puerto Pilcomayo), como se observa en la figura 2.a, cuando coincide PDO+ con EN, hay un fuerte incremento de los caudales promedio trimestrales (más del 40%), con un alto grado de significación (en todos los casos menor o igual a 0.005). Esto indica que en este caso habría una variación en el caudal del trimestre de junio, julio y agosto, el de mayor caudal en promedio. En este trimestre es también cuando ocurre la disminución más significativa en presencia de PDO- en fase con LN, del orden del 15%.

La figura 2.b muestra que para el río Paraná (Corrientes) se incrementan los caudales promedio trimestrales cuando coincide PDO+ con EN, en particular en los tres últimos trimestres del año hidrológico (entre el 20% y 30%). Es importante tenerlo en cuenta en el segundo y tercero debido a que en promedio, son los trimestres de mayor caudal. Cuando coincide PDO- con LN, los valores rondan como máximo una disminución del 10%.

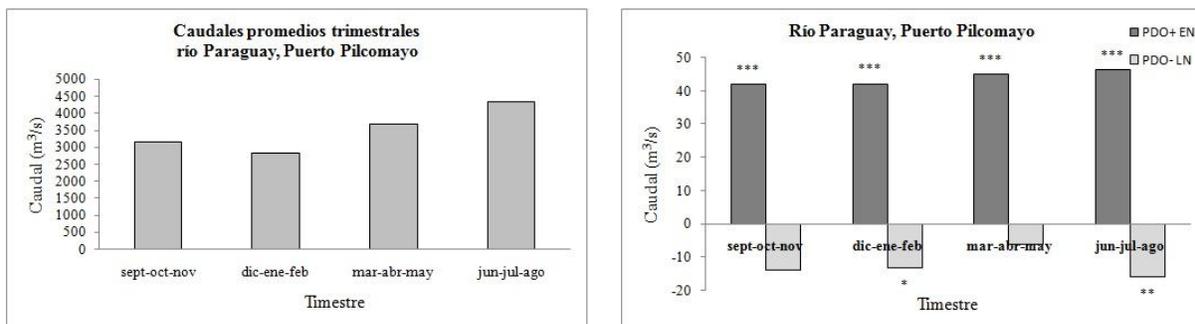
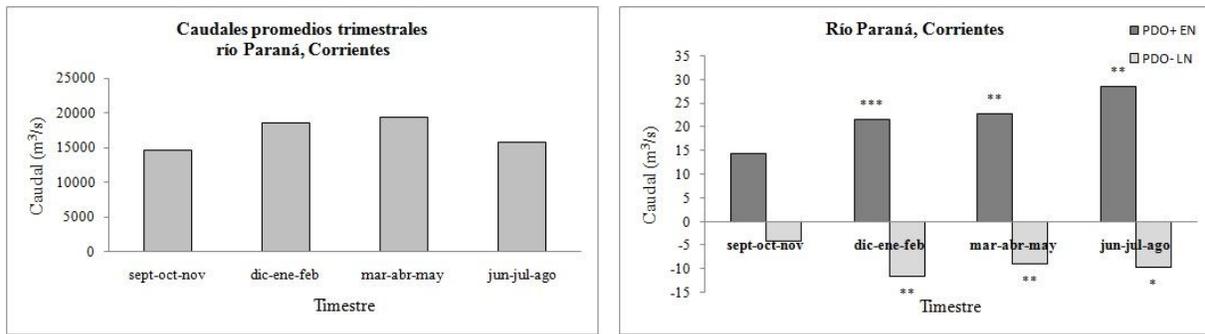
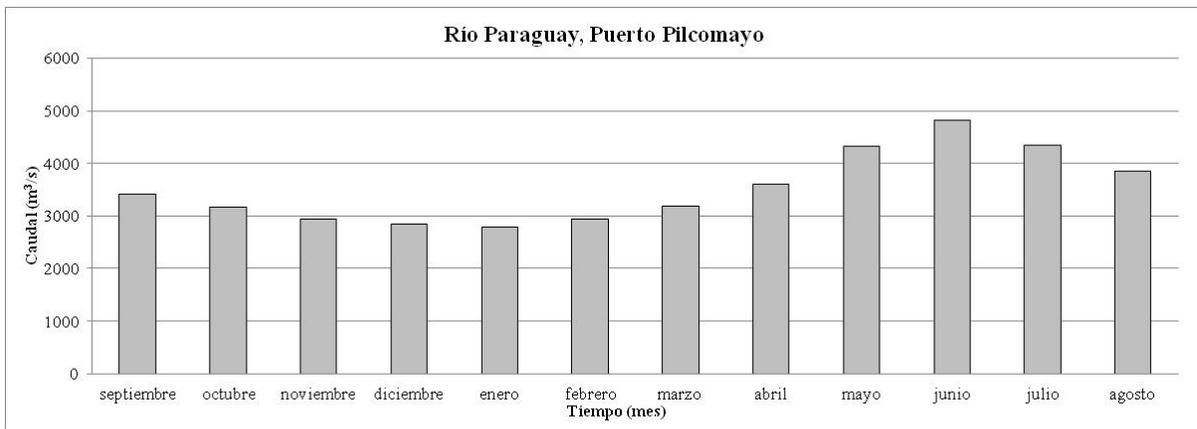
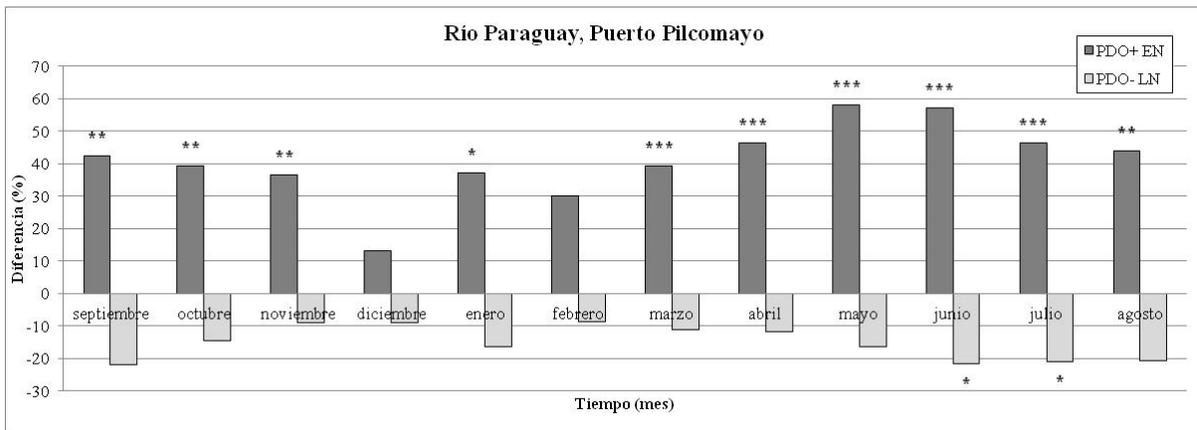


Figura 2.a.- Comparación de los promedios trimestrales con la diferencia porcentual para el río Paraguay según su clasificación PDO+ coincidiendo EN (gris oscuro) y PDO- coincidiendo con LN (gris claro).



**Figura 2.b-** Comparación de los promedios trimestrales con la diferencia porcentual para el río Paraná según su clasificación PDO+ coincidiendo EN (gris oscuro) y PDO- coincidiendo con LN (gris claro).

Las figura 3.a y 3.b, muestran para cada río la diferencia porcentual promedio mensual de los años EN y LN, coincidiendo con PDO positivo (gris oscuro) y negativo (gris claro) respectivamente. Los asteriscos indican la significancia según la prueba Wilcoxon siendo \*\*\* menor que 0.01, \*\*menor que 0.05 y \* menor que 0.1.

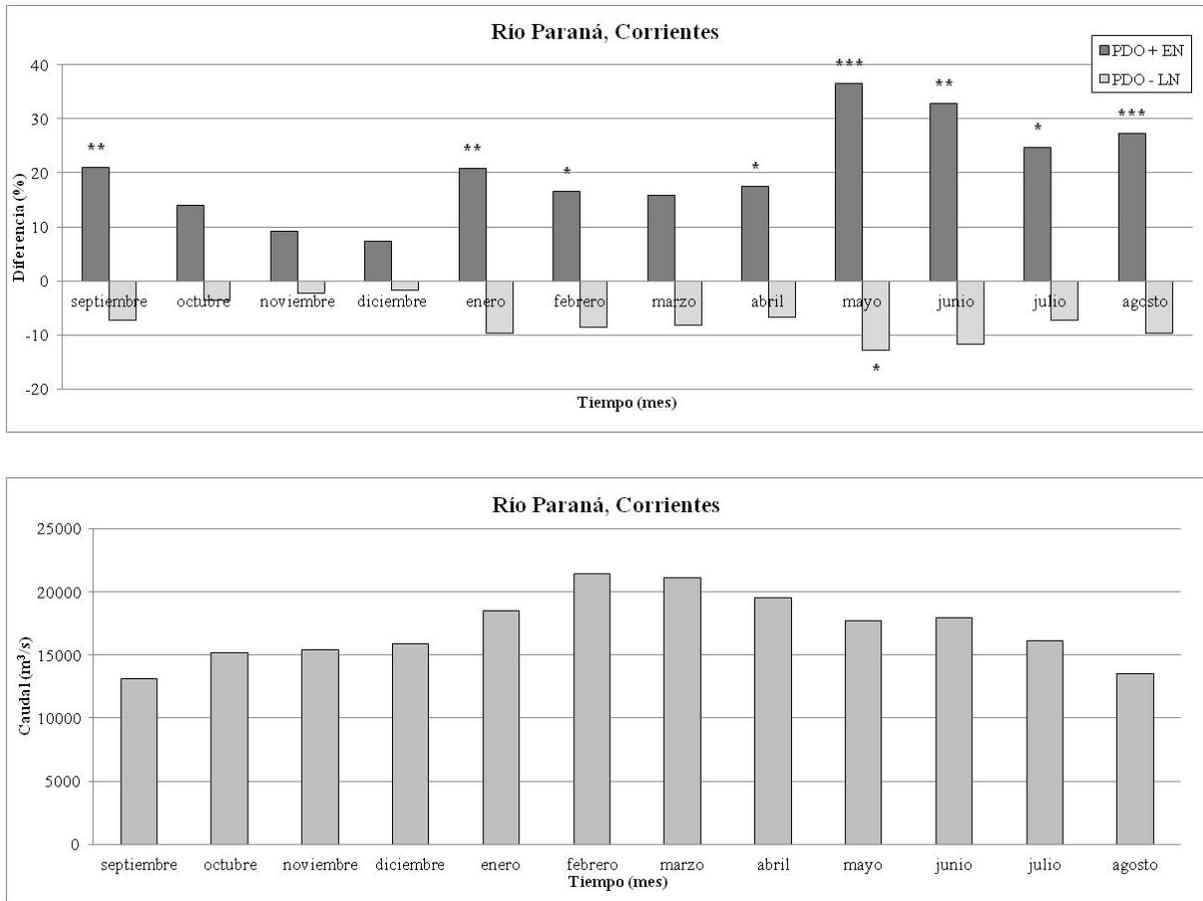


**Figura 3.a-** Comparación de los promedios mensuales con la diferencia porcentual para el río Paraná según su clasificación PDO+ coincidiendo EN (gris oscuro) y PDO- coincidiendo con LN (gris claro).

Se observa en la Figura 3.a que para el río Paraguay, en Puerto Pilcomayo, el mayor aumento de los caudales por coincidir El Niño con la fase positiva del PDO se evidencia, en promedio, con los meses que el río en

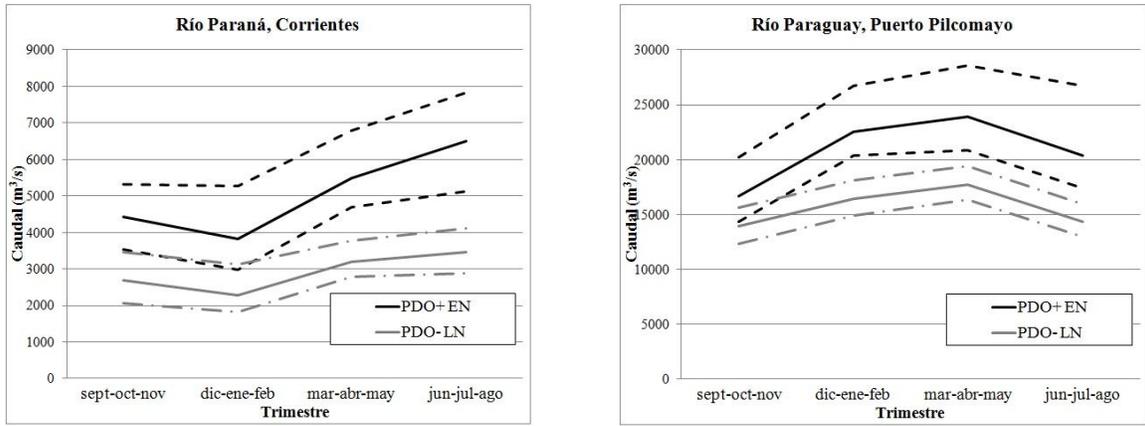
promedio tiene mayor caudal. En los meses en los cuales ocurren los caudales máximos puede esperarse un aumento, que en promedio es del orden del 50%.

Sin embargo, como se observa en la Figura 3.b, en el río Paraná en la estación Corrientes no coincide exactamente los meses que en promedio ocurren los mayores caudales, pero de todas formas debe tenerse en cuenta, ya que en mayo y junio cuando coincide El Niño con la fase positiva del PDO pueden aparecer aumentos, que en promedio son del 30%.

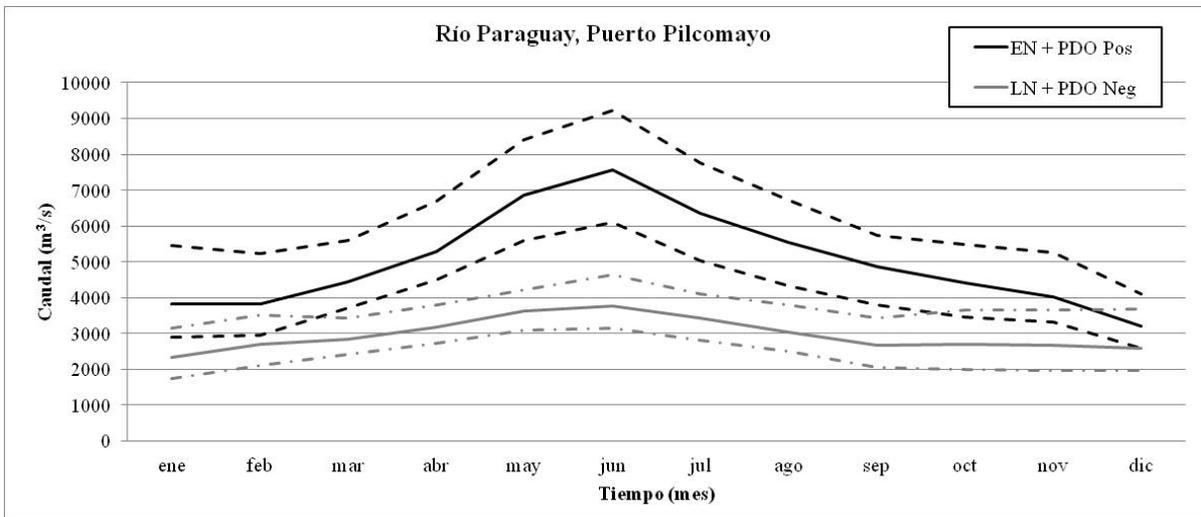
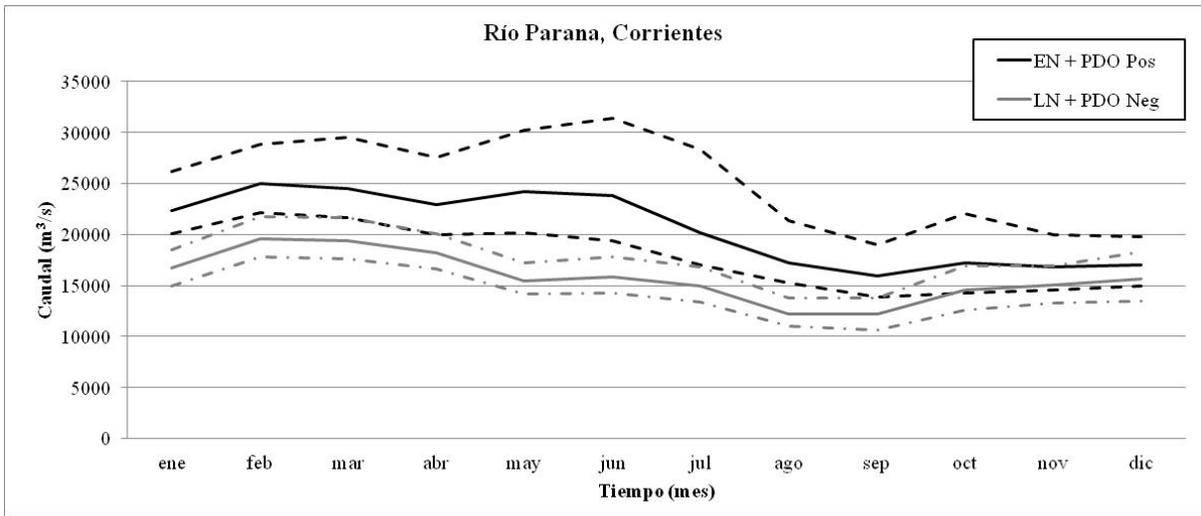


**Figura 3.b-** Comparación de los promedios mensuales con la diferencia porcentual para el río Paraná según su clasificación PDO+ coincidiendo EN (gris oscuro) y PDO- coincidiendo con LN (gris claro).

La Figura 4 muestra que, en general para el río Paraguay y Paraná, los intervalos de confianza son claramente diferentes para el caso que coincide EN con PDO+ con respecto a LN con PDO-. En la Figura 5 muestra lo mismo pero con mayor detalle, ya que es a escala mensual.



**Figura 4.-** Promedios trimestrales y sus intervalos de confianza en línea punteada, para cada río, según el análisis de Bootstrap. En negro el caso que coincide EN con PDO+ y en gris LN con PDO-.



**Figura 5.-** Promedios mensuales y sus intervalos de confianza en línea punteada, para cada río, según el análisis de Bootstrap. En negro el caso que coincide EN con PDO+ y en gris LN con PDO-.

En todos los casos se observa que cuando coincide PDO+ con EN, el intervalo de confianza resulta mayor que cuando coincide PDO- con LN, lo que indicaría una mayor dispersión en los resultados.

Los resultados obtenidos son consistentes con los presentados en la bibliografía, Silva *et al* (2011) obtiene valores numéricos que revelan que la distintas fases PDO influyen en la respuesta de El Niño en América del Sur, encontrando anomalías positivas en la precipitación en la mayor parte del Sureste de América del Sur para el verano austral. En China, se observa un resultado semejante, solo que EN y PDO+ en esta región está asociado con una disminución en el caudal (menor precipitación) y se observa lo contrario con LN y PDO-, Ouyang (2014).

## CONCLUSIONES

Se han estudiado dos series hidrológicas de caudales medios mensuales y promedios trimestrales observadas en dos ríos de Sudamérica. Para los casos analizados se ha presentado una clara evidencia cuantitativa de la influencia del fenómeno del PDO en conjunto con el ENSO sobre los caudales medios mensuales y promedio trimestrales. Ambas cuencas resultan interesantes por ser de gran extensión, en particular la del río Paraná en Corrientes, lo cual permite destacar el rol de la variabilidad climática natural en distintas escalas espacio-temporales.

La evaluación del impacto de la superposición de estos indicadores sobre los caudales permitirá disponer de nueva información para alcanzar una mejor planificación del recurso hídrico y en particular sobre la energía hidroeléctrica en un gran sistema de Argentina, la cuenca del Plata.

Esta variabilidad climática natural (PDO), que persiste por un período extenso dentro de la vida útil de las obras hidráulicas, hace necesario evaluar una posible adecuación de las normas de operación de los embalses ante situaciones diferentes a las estimadas durante los estudios originales. Una utilidad práctica de este estudio podría ser pensar este nuevo diseño de las normas de operación a partir de la variación de los caudales obtenida. Estas en un contexto estacionario podrían permanecer constantes a lo largo de la vida útil de la obra. Sin embargo, los nuevos estudios en Hidrología muestran la importancia de considerar la posible presencia de condiciones no estacionarias de las variables hidrológicas asociadas con la variabilidad climática natural.

## REFERENCIAS

Andreoli R.V. and Kayano M.T. (2005) “ENSO-related rainfall anomalies in South America and associated circulation features during Warm and Cold Pacific Decadal Oscillation regimes”. *International Journal of Climatology*, 25: 2017–2030.

- Canty Angelo y Ripley, Brian (2015). “boot: Bootstrap R (S-Plus) Functions.” *R package* version 1.3-17.
- Davison, A. C. & Hinkley, D. V. (1997) “Bootstrap Methods and Their Applications.” Cambridge University Press, Cambridge. ISBN 0-521-57391-2
- Efron B. and Tibshirani R.J. (1993) “*An Introduction to Bootstrap*”- Monographs on Statistics and Applied Probability 57, Chapman & Hall.
- Kayano M.T. and Andreoli R.V. (2007) “Relations of South American summer rainfall interannual variations with the Pacific Decadal Oscillation”. *International Journal of Climatology*, 27: 531–540.
- Mantua N. J., Hare S.R., Zhang, Y., Wallace J.M and Francis R. C. (1997) “A Pacific Interdecadal Climate Oscillation with Impacts on Salmon Production”. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78:1069-1079.
- Mantua N. J. and Hare S.R. (2002) “The Pacific Decadal Oscillation” *Journal of Oceanography*, Vol. 58, 35-44.
- Neal E. G., Todd Walter M. and Coffeen C. (2002) “Linking the pacific decadal oscillation to seasonal stream discharge patterns in Southeast Alaska” *Journal of Hydrology*, Vol. 263, 188 - 197.
- Ouyang R., Liu W., Fu G., Liu C., Hu L., and Wang H. (2014) “Linkages between ENSO/PDO signals and precipitation, streamflow in China during the last 100 years”. *Hydrology and Earth System Science*, 18, 3651–3661.
- R Core Team (2014). “R: A language and environment for statistical computing.” *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, Austria. URL <http://www.R-project.org/>.
- Silva G. A. M., Drumond A. and Ambrizzi T. (2011) “The impact of El Niño on South American summer climate during different phases of the Pacific Decadal Oscillation”. *Theoretical and Applied Climatology* 06:307–319.
- Suriano, M. y Seoane R. (2016) - “Evaluación del impacto del ENSO y del PDO en ríos de Argentina”- *XXVII Congreso Latinoamericano De Hidráulica*. Lima, Perú.