

# Análisis hidrométrico en estaciones centenarias del Río Uruguay y Paraná

*Melanie Meis y María Paula Llano*

Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos (DCAO, FCEN-UBA) - CONICET, Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria, Pab 2 (C1428EGA), Buenos Aires, Argentina.

E-mail: mmeis@at.fcen.uba.ar

## RESUMEN

La Cuenca del Plata localizada entre 14° y 37° S y entre 43° y 67° O, presenta una superficie de 3.6 millones de km<sup>2</sup>. Es una fuente capaz de proveer agua para la ganadería, la agricultura y la generación de energía. Es por ello, que resulta necesario profundizar estudios hidrológicos que permitan optimizar el uso de los ríos que comprenden dicha cuenca hídrica.

Durante el período temporal 1909-2013 son estudiadas las estaciones: Corrientes, Túnel Subfluvial, Timbúes (pertenecientes al Río Paraná) y Paso de los Libres (Río Uruguay). Se realiza un análisis hidrológico de largo plazo: ondas anuales medias, comportamiento de máximos y mínimos absolutos, y desvíos típicos. Se estudian las distribuciones empíricas de derrame anual, obteniéndose que las cuatro estaciones presentan una distribución lognormal con un 95% de confianza. Además, se correlacionan valores de anomalías mensuales de caudal entre las cuatro estaciones mediante un test de Rank Kendall, donde la correlación aumenta al disminuir la distancia geográfica entre las estaciones (río Paraná). En el caso de la estación Paso de los Libres, la mejor relación con el río Paraná sería a través de la estación Corrientes.

La presencia de ciclos de anomalías de caudales es estudiada mediante espectro simple, encontrándose un comportamiento distinto en cuanto a la distribución de energía entre las estaciones del río Paraná y la estación representativa del río Uruguay. Se profundiza el análisis anterior con la metodología wavelets observándose ondas entre los 8 y 10 años presentes en diferentes momentos del período de análisis. Por último, los espectros cruzados entre todos los pares de estaciones posibles son estudiados hallándose que al disminuir la distancia la cantidad de ondas que se hacen presentes en las dos estaciones aumenta. Mientras, que el espectro cruzado de las estaciones del río Paraná con la estación del río Uruguay presenta una coherencia menor.

## INTRODUCCIÓN

La Argentina es fuertemente dependiente de la conjunción clima y regímenes hidrológicos. La Cuenca del Plata localizada en el sur de Sudamérica, entre 14° y 37° sur y entre 43° y 67° oeste, cuenta con una superficie de 3.6 millones de km<sup>2</sup>, abarcando grandes extensiones geográficas de Argentina, Brasil, Uruguay, Bolivia y en su totalidad a Paraguay. Argentina y Brasil cuentan con las mayores áreas territoriales de la Cuenca del Plata, 30% y 46% respectivamente. Enormes dimensiones horizontales la hacen una fuente capaz de proveer agua para la ganadería y agricultura, como así también para el aprovechamiento energético. Es por ello que resulta necesario realizar estudios hidrológicos que permitan optimizar el uso de los ríos que comprenden la Cuenca del Plata.

Es preciso primeramente estudiar la síntesis climática hidrológica de cada río, en especial los de gran caudal, ya que en estos se realizan los principales aprovechamientos de energía y riego en Argentina. Vargas *et al.* (2010) analizan la estructura de los datos de los ríos Paraná y Uruguay para poder tomar un modelo de decisión con respecto a la ocurrencia de extremos climáticos. Estudios de las estructuras del régimen hídrico de la Cuenca del Plata presentan cambios y diferentes tendencias (García y Vargas, 1998).

Diferentes causas, entre ellas las climáticas, pueden generar distintos estados sobre los caudales; la variabilidad en los mismos responde a diversos fenómenos aleatorios. Uno de ellos es el fenómeno ENSO (El Niño Southern Oscillation), que es estudiado por diferentes autores en escala regional en la Cuenca del Plata (Grimm *et al.*, 2000; Camilloni y Barros, 2003). Esta asociación con El Niño también es realizada en otras cuencas de la Argentina: Compagnucci y Vargas (1998) analizan la variabilidad interanual en los ríos que comprenden la zona de Cuyo, al igual que Carril y otros (1997), donde también relacionan los estudios de los oasis en la Argentina cordillerana con el fenómeno ENSO.

Asimismo es importante tener en cuenta que diferentes autores han estudiado cómo la precipitación tiene impacto en el caudal (García y Vargas, 1995; Collischonn *et al.*, 2001), los mismos notan que el aumento en la descarga de los ríos ha sido mayor si se lo compara con su respectiva precipitación media en la Cuenca del Plata. Estas diferencias significativas podrían estar asociadas con la deforestación y cambios en la agricultura dando lugar a un mayor escurrimiento (Tucci, 2001), y como consecuencia a una variación en la tasa de infiltración. De la misma forma, un enfoque adicional podría ser el estudio de caudales de Saurral *et al.* (2008) donde analizan como el uso del suelo impacta en la descarga del caudal del río Uruguay.

A partir del estudio de distintos autores sobre el Low Level Jet (Berbery y Collini 2000; Berbery y Barros 2002), la zona de convergencia del Atlántico Sur (Barros y otros 2000; Barros *et al.* 2002) y la presencia del anticiclón del Atlántico Sur (Prohaska, 1976), se determinó que los mismos constituyen factores fundamentales y determinantes del clima y de la precipitación en la Cuenca del Plata. De esta manera es necesario comprender en varios aspectos el comportamiento de los caudales, es posible mencionar estudios sobre la producción y la demanda hidroeléctrica en la Cuenca del Plata (Popescu *et al.*, 2012). Más aún, el posible cambio climático expuesto por varios científicos habría llevado a una escasez de energía en periodos de sequía dando lugar a ciertos problemas en cuanto al suministro de la misma. Sin embargo es oportuno notar, por otro lado que el caudal medio de la Cuenca del Plata considerándolo un todo ha aumentado un 35% desde 1951-1970 a 1980-1999 (Berbery y Barros, 2002), mejorando la producción de energía hidroeléctrica, navegación y otros usos sobre los recursos hídricos.

En este trabajo el análisis se centra en el río Paraná y Uruguay dentro del territorio argentino. El primero presenta irregularidades en su recorrido, en un primer tramo previo a la desembocadura del río Paraguay presenta una pendiente, luego se convierte en una gran planicie (Barros *et al.*, 2006) dando como resultado variaciones en la sección del río. Por otro lado, el río Uruguay presenta un terreno no tan homogéneo con varios afluentes y acentuada pendiente, de todas maneras no hay grandes variaciones en la sección del río a lo largo de su recorrido. El río Uruguay presenta un caudal medio anual 5 veces menor al

observado en el río Paraná. Al formar parte de una de las cuencas más importantes del mundo, se considera necesario continuar con la profundización del estudio en esta región. Para ello se pretende analizar el comportamiento de los caudales que describe a cada uno de los ríos a nivel hidro-climático y más aún debido a interacciones con patrones de índole meteorológicos.

Finalmente, se estudia la coherencia conjunta regional de la serie de caudales en las estaciones del río Paraná y el Uruguay. Lo anterior es fundamental para intentar dar lugar a una proyección de obras sobre recursos hídricos y el manejo de los mismos en distintos estados climáticos (Oki y Kanae, 2006).

## DATOS Y METODOLOGÍAS

Se cuenta con una base de datos de caudal mensual que involucra tres estaciones del río Paraná y una del río Uruguay (Figura 1), proveniente de la Subsecretaría de Recursos Hídricos. Luego de un análisis de calidad de la información y de concordancia en los períodos de estudio se considera el periodo temporal 1909-2013. Si bien ambos ríos tienen su origen en estados brasileños, el estudio se centra en territorio argentino.

El estudio comienza con un análisis estadístico para caracterizar a las estaciones: onda media anual (constituida por los caudales medios mensuales), máximos y mínimos absolutos, y desvíos estándar típicos de caudal mes a mes en las 4 estaciones para los 105 años de periodo en común en todas las estaciones.

Luego, se continúa el estudio mediante un análisis de correlación de series temporales. Previamente, se filtra la tendencia lineal mediante la recta de regresión por cuadrados mínimos, pues la misma resulta significativa con un 95% de confianza mediante un test t-Student, además teniendo en cuenta que la onda anual es un factor influyente se la filtra restando a cada mes su valor medio. Con los valores anómalos de caudal mensual se realiza un análisis de correlación entre pares de estaciones. Debido a que las series de tiempo obtenidas no resultan seguir una distribución normal, se considera el coeficiente de correlación de Rank Kendall, cuyo estadístico es  $\tau$  (Ec. 1). Dicha metodología no paramétrica permite establecer la existencia de una relación o no entre dos conjuntos de datos, mediante una medición ordinal de ambas variables X e Y, de modo que a cada sujeto pueda asignársele un rango en X e Y (Siegel, 1985).

Se plantea la hipótesis nula ( $H_0$ ) de que X e Y son independientes y se obtiene el siguiente estadístico

$$\tau = \frac{n_c - n_d}{\frac{1}{2}N(N-1)} \quad (1)$$

$n_c$ : número de pares concordantes, es decir pares  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  tales que  $x_1 > x_2$  y  $y_1 > y_2$ .

$n_d$ : número de pares discordantes, es decir pares  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  tales que  $x_1 > x_2$  y  $y_1 < y_2$ .

$N$ : cantidad de datos.

En lo que refiere al test de significancia, dada la cantidad de datos empleados por cada estación es posible seguir una distribución normal y luego analizar los valores de p-valor (95 % de significancia).

Además, se intenta estimar la distribución teórica que presentan los valores anuales acumulados normalizados de caudal para el periodo en cuestión en las estaciones: Corrientes, Túnel Subfluvial, Timbúes

y Paso de los Libres. Para ello se emplea el test de Kolmogórov-Smirnov ( $K-S$ ), a la muestra de cada estación se la compara con diferentes distribuciones teóricas, aplicando la metodología de Bootstrap (Efron y Tibshirani, 1993).

Con el objetivo de estudiar la presencia de ciclos, se realiza un análisis espectral mediante el método de Blackman Tukey. Como calcular la potencia espectral conlleva a que los resultados estén afectados por problemas relacionados con el ancho de banda, es decir pérdida de potencia (leakage), se propone implementar una “ventana” para reducir el error de muestreo. En este trabajo se hace uso de la ventana de Hanning para suavizar el espectro, utilizando el 30% de los datos para poder preservar la estabilidad del análisis, según la Nota Técnica N°79 de la Organización Meteorológica Mundial sobre el Cambio Climático (OMM, 1966).

Complementando este análisis espectral se incorpora la metodología Wavelets, la misma resulta útil para detectar señales en el espectro no evidentes al considerar el método de Blackman Tukey (Wavelets in Geophysics, 1994). Se aplica Morlet Wavelet, y como la misma es compleja presenta la ventaja de que cierto tipo de información con respecto a la amplitud y la fase del proceso pueden extraerse. Además, algunos parámetros son especificados con respecto al número de onda ( $w_0$ ) y la menor escala temporal ( $s_0$ ). En este caso, se considera,  $w_0=6$  and  $s_0=2$  meses, donde el ultimo es un múltiplo de la resolución temporal. Por otra parte, la menor frecuencia es elegida como una potencia de dos, siempre y cuando sea menor que la mitad de la cantidad de datos considerados. (Torrence y Compo, 1998)

Así mismo, se implementa la metodología de espectros cruzados para analizar el comportamiento conjunto de diferentes ciclos presentes en las series. En dos series  $x(t)$  e  $y(t)$  es posible, estudiar la relación existente entre ambas a partir del método de correlaciones cruzadas, pero no se logra obtener información de si la misma se corresponde a alta o baja frecuencia (Panofsky, 1965). Entonces, cuando se desea estudiar el grado de correlación entre distintas series para cada frecuencia es necesario emplear la metodología de espectro cruzado Si dos series  $x(t)$  e  $y(t)$  tienen a  $\bar{X}$  e  $\bar{Y}$  valores medios respectivamente, se puede obtener la varianza como:

$$cov(x, y) = [E (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})] \tag{2}$$

La función de covarianza se puede definir para distintos desplazamientos dando una idea del grado de semejanza entre las dos series temporales. Si se aplica el teorema de Wiener–Khinchin para obtener la transformada de Fourier de la densidad espectral cruzada y tomando sólo la parte positiva, se obtiene el par transformado. Ésta involucra la función de covarianza cruzada  $G_{XY}(f)$  y como es una función impar, se puede expresar como una variable compleja compuesta de una parte real y una parte imaginaria

$$G_{XY}(f) = C_{xy}(f) - iQ(f) \tag{3}$$

$C_{XY}(f)$ : coespectro

$Q(f)$ : espectro de cuadratura

El coespectro mide la contribución de oscilaciones de diferentes frecuencias al total de la covarianza cruzada a *lag* cero entre dos series de tiempo. No hay un desplazamiento temporal.

La cuadratura mide la contribución de los diferentes armónicos al total de la covarianza cuando una de las series se desplaza temporalmente  $\frac{\pi}{2}$  en la fase respecto de la otra para una frecuencia dada.

Finalmente, para intentar establecer que tan buena es la relación entre las dos series temporales para los distintos periodos, se hace uso del coeficiente de coherencia cuadrada:

$$CH(f) = \frac{Q^2(f) + c_{XY}^2(f)}{S_X(f)S_Y(f)} \quad (4)$$

$S_X(f)$  y  $S_Y(f)$ : espectros estimados para X e Y a una frecuencia f.

La coherencia cuadrada puede variar entre 0 a 1, y es análogo al coeficiente de correlación. El valor del coeficiente de coherencia representa la correlación al cuadrado entre los componentes cíclicos en dos series de tiempo para una respectiva frecuencia.

Una manera de poder establecer un límite de significancia para el coeficiente de coherencia cuadrada viene dada por el trabajo de Goodman (1957). La fórmula aproximada para limitar la coherencia a una cierta probabilidad *p-level* resulta ser:

$$\beta = \sqrt{1 - p^{\frac{1}{df-1}}} \quad (5)$$

*df*: número de grados de libertad definido con respecto al análisis del espacio espectral por  $\frac{2N-m}{m}$ , con *m* número de datos considerados para realizar la metodología de espectros cruzados.

## ANALISIS Y RESULTADOS

Con el fin de realizar una comparación de largo plazo de series hidrométricas principalmente en lo referido a las ondas anuales, al comportamiento de los máximos y mínimos y de los desvíos típicos, se realiza una estadística para las cuatro estaciones del río Paraná: Corrientes, Túnel Subfluvial, Timbúes y la estación: Paso de los Libres para el río Uruguay (Figura 2). Con respecto a esta última estación el año 1945 se encuentra faltante por lo que se decide completarlo con el valor de la onda media anual. Cabe destacar que en rasgos generales el volumen acumulado mensual que circula en el río Paraná es en promedio 5 veces mayor que el caudal que circula en el río Uruguay.

### *Estudio de los caudales en el período centenario (1909-2013)*

En rasgos generales, durante los meses fríos se observa una disminución del caudal en las estaciones consideradas del río Paraná, no así en la estación Paso de los Libres del río Uruguay que presenta en esta época un aumento hasta alcanzar un máximo destacable en el mes de octubre, el cuál es coincidente con el máximo secundario presente en la estación Corrientes. En el Paraná, se observa que los meses de mayor

variabilidad de caudal no coinciden con los meses de máximo y mínimo caudal medio, ya que la máxima variabilidad es durante el primer semestre del año (enero-junio). Mientras que en el río Uruguay la mayor variabilidad es en el mes de octubre coincidente con el mes de máximo caudal promedio. Además, se destaca que la estación Paso de los Libres presenta tanto la máxima como la mínima variabilidad durante el último cuatrimestre del año.

En lo que se refiere al comportamiento de los máximos absolutos, se encuentra que en la estación Túnel Subfluvial el mes de máximo caudal es junio de 1992, sin embargo al considerar valores anuales, 1998 es el de mayor caudal en todo el periodo analizado, por otro lado, Timbúes presenta máximos absolutos durante el mes mayo de 1998. Estos valores máximos de caudal tanto mensual como anual pueden estar relacionados con el fenómeno del Niño (1991 mayo – 1992 junio, abril 1997- abril 1998). En la estación Corrientes el máximo absoluto se encuentra en junio de 1983 lo que se condice climatológicamente con un año Niño (marzo 1982-junio 1983). Por otro lado, con respecto al río Uruguay, en Paso de los Libres, el máximo absoluto sucede en mayo 1941. Salvo la estación Paso de los Libres los valores máximos absolutos de caudal suceden durante la segunda mitad del siglo XX.

En lo que refiere al mínimo absoluto de caudal, las estaciones del río Paraná presentan el mínimo en el año 1944 (septiembre-octubre), en cambio el río Uruguay tiene presente el mínimo absoluto en enero del año anterior. Los años 1943-1944 no se condicen con un evento Niña intenso (según *Extended Multivariate ENSO Index*, [http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei.ext/#ref\\_ts](http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei.ext/#ref_ts))

Dentro de este periodo temporal se plantea la necesidad de contemplar la posibilidad de que la implementación de represas hidroeléctricas haya afectado el volumen de caudal que circula por los ríos Paraná y Uruguay. Teniendo en cuenta la base de datos considerada y la ubicación de las represas, se analiza el caudal medio anual en las estaciones Corrientes y Paso de los Libres (representativas de ambos ríos) en un intervalo de duración de 14 años previos al comienzo de la construcción e igual lapso de tiempo posterior a la finalización de la construcción de la represa de Yaciretá e Itá, respectivamente. De esta manera, se considera que Yaciretá comenzó su construcción en el año 1983, y fue puesta en funcionamiento en el año 1994, en cuanto a la represa Itá sus obras comenzaron en 1997 y su inauguración se realizó en el año 2000. En ambas estaciones, se observa un amortiguamiento en los valores de la onda anual de caudal. Es decir, los valores de caudal asociados a los mayores crecimientos se vieron disminuidos y los mínimos de caudal se vieron aumentados con respecto al intervalo temporal previo a la construcción de las represas.

### *Función de distribución de valores acumulados*

Se desea estudiar la distribución empírica del derrame anual. Para ello se ajustan distintas distribuciones de densidad de probabilidad entre ellas Normal y Gamma. Sin embargo, se obtiene que los datos acumulados anuales de caudal siguen una distribución Lognormal con parámetros (media y desvío) para cada una de las cuatro estaciones. Se muestra a modo de ejemplo la distribución de densidad empírica junto con la distribución de densidad teórica lognormal de igual media y desvío estimados para la estación Corrientes, (Figura 3).

### *Relación entre los caudales*

Se analizan las correlaciones de los datos de anomalías de caudal mensual entre pares de estaciones. Previamente la distribución de dichos datos es analizada mediante test de hipótesis: *Lillie test* y *Shapiro*, hallando que los datos no siguen una distribución normal con un 95% de confianza. Por lo cual se considera emplear un test no paramétrico: *Rank Kendall* ( $\tau$ ) (Ec. 1).

Se observa que dentro de un mismo río la correlación aumenta al disminuir la distancia geográfica entre las dos estaciones, pues como los *p-valores* obtenidos son menores a  $2.2 \times 10^{-16}$  se rechaza la hipótesis nula de que los pares de datos no se encuentran correlacionados con un 95% de confianza. En el caso del río Uruguay donde se correlaciona la estación Paso de los Libres con las del río Paraná se encuentra la mejor relación con la estación Corrientes (Tabla 1).

### *Estructura espacial de la variabilidad*

Para estudiar la presencia de ciclos característicos en las series centenarias de anomalías de caudales se realiza un análisis espectral. Para ello, se determinan subgrupos temporales trimestrales que se disponen cubriendo un espacio temporal de aproximadamente dos años: entre 2 y 5 meses, entre 5 y 8 meses, entre 8 y 11 meses, entre 11 y 14 meses, 14 y 17 meses, 17 y 20 meses, entre 20 y 23, y finalmente entre 23 y 26 meses.

Se propone trazar isolíneas de igual densidad de energía (obtenida mediante el análisis espectral). Es importante aclarar que se normaliza la energía total acumulada en cada subgrupo temporal, es decir, la energía total es dividida por la cantidad de frecuencias temporales dentro de cada subgrupo. Se intenta poder determinar centros de máxima o mínima energía en un período máximo de dos años, como así también desplazamientos de los mismos. Las estaciones están ordenadas de norte a sur y se analiza cada período considerado, los valores de energía en los gráficos están multiplicados por  $10^{-8}$  (debido a la magnitud de los mismos). En las Figura 4 se observa un comportamiento distinto en cuanto a la distribución de la energía entre las estaciones del río Paraná y la estación representativa del río Uruguay. Se halla un máximo de energía en Corrientes, Túnel y Timbúes alrededor de los 12.5 meses, mientras que el máximo en Paso de los Libres se observa alrededor de los 22 meses. Además, en lo que refiere a las estaciones del río Paraná la estación Corrientes presenta un 40% más de energía.

Además, se considera la metodología espectral asociada a wavelets. En este periodo de 105 años, se observa la presencia de ondas entre los 8 y 10 años. Esta onda exhibiría dos intervalos de tiempo de influencia entre 1926 a 1934; y entre 1968 a 1993, excepto en el río Uruguay donde la estación Paso de los Libres no presenta el primer periodo temporal. Por otro lado, la presencia de las ondas cortas esporádicas entre cuatro y cinco meses continúa estando presentes en la serie temporal completa.

Resulta interesante plantearse en futuros trabajos las posibles causas y orígenes de estas ondas más largas (entre 8 y 10 años) y la relación de las mismas con posibles modos de variabilidad.

### *Coherencia entre los regímenes de los ríos Paraná y Uruguay*

Para analizar el comportamiento conjunto de las ondas características se realizan los espectros cruzados en pares de estaciones con Timbúes como estación de referencia para el río Paraná. Se analiza el valor de coherencia cuadrada y fase de las ondas resultantes. Se considera que los valores de coherencia cuadrada superiores a 0.83 son significativos, permitiendo determinar que ondas están presentes en dos estaciones a la vez. Por otro lado el análisis de la fase da una idea de del tiempo de retardo una onda característica entre un par de estaciones. El signo de la fase (en este caso positivo) es coherente con la ubicación de las estaciones al considerar como variable dependiente a Timbúes. En el río Paraná, se observa que al disminuir la distancia entre los pares de estaciones la cantidad de ondas que se hacen presente en las dos estaciones aumenta. En este sentido, se muestra el espectro cruzado entre Corrientes-Timbúes en la Figura 5. Considerando que los valores de coherencia superiores a 0.83 involucran una onda significativa, se observa que ondas con periodo mayor a 5 meses se encuentran presentes en ambas estaciones, mientras que las ondas entre 2 y 3 meses no resultarían significativas. Además, se estudia la diferencia de fase entre el par Corrientes-Timbúes encontrándose que ondas entre 6 y 12 meses tardan entre 21 y 24 días respectivamente en hacerse presentes en la estación Timbúes.

El análisis anterior también es realizado con ondas de mayor variabilidad: 2 años, y entre 8 y 10 años, donde las últimas probablemente ligadas con el modo de variabilidad ENSO. Con respecto a la primera las ondas tardan 30 días en dar una señal en Timbúes, mientras que para la última en promedio unos 36 días. Sin embargo, un desfase de 36 días en una onda diez años es prácticamente decir que ocurren en forma simultánea.

También se considera el espectro cruzado de las estaciones del río Paraná con la única estación del río Uruguay. Dando como resultado que la coherencia de las ondas es menor. Sin embargo, se puede destacar que el par Timbúes-Paso presentaría una mayor coherencia con respecto a Corrientes-Paso y Túnel-Paso.

## CONCLUSIONES

Todos los estudios exploratorios que se realizan sobre los caudales en la Cuenca del Plata son beneficiosos y necesarios para conocer su interacción con el clima y para la implementación y el desarrollo de modelos lluvia-caudal. Siendo esta cuenca una de las más importantes del mundo, no solo con respecto a su extensión sino también en cuanto a sus recursos hídricos disponibles, se pretende analizar la variabilidad de los caudales y la eficiencia de la red de información de los dos ríos de mayor relevancia de la cuenca en cuestión: Uruguay y Paraná dentro del territorio argentino. Se utiliza la estructura estadística y el análisis espectral de los caudales mensuales para representar la variabilidad temporal y espacial como elementos de diagnóstico.

Inicialmente se examinan las marchas anuales de caudales y sus diferencias entre ambos ríos. Al filtrar la onda anual y la tendencia, se observa en el río Paraná la presencia de ondas cortas significativas entre 4 y 6 meses, mientras que el río Uruguay presenta ondas significativas más frecuentes (alrededor de los tres meses). Mediante la metodología de *wavelets* es posible detectar la existencia de ondas más largas entre 8 y 10 años en las cuatro estaciones.

El análisis previo y posterior a la construcción de represas hidroeléctricas, permite encontrar que las mismas actúan como moduladoras del caudal y esto es claramente reflejado en la onda de 12 meses.

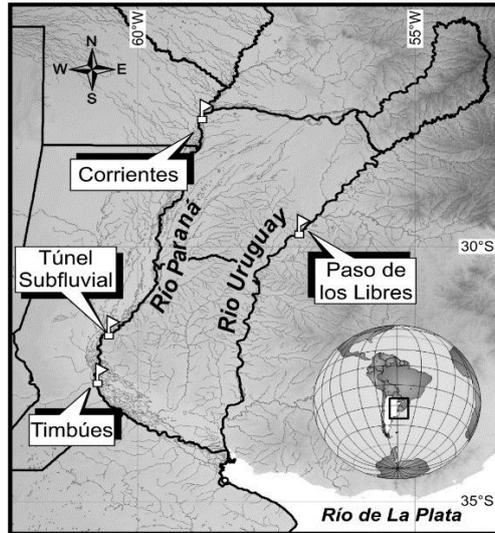
Las anomalías respecto al promedio de los caudales mensuales no siguen una distribución normal con lo cual se emplean test no paramétricos para estudiar la correlación dentro de cada grupo temporal. Se determina que hay una relación entre las estaciones de cada río y que la misma aumenta al disminuir la distancia entre los pares de estaciones.

Al analizar la distribución teórica con respecto al derrame anual en las estaciones consideradas, las mismas se ajustan a una distribución *lognormal* con un 95% de confianza. Es decir, las distribuciones de frecuencias para las estaciones a lo largo de la cuenca exhiben el mismo modelo, por lo tanto para este criterio considerar las tres estaciones del río Paraná resultaría redundante. En este sentido, el análisis de las distribuciones demuestra que un hipotético modelo estadístico de precipitación-escorrentía tendrá que considerar obligatoriamente que las mismas en los puntos del río no son normales.

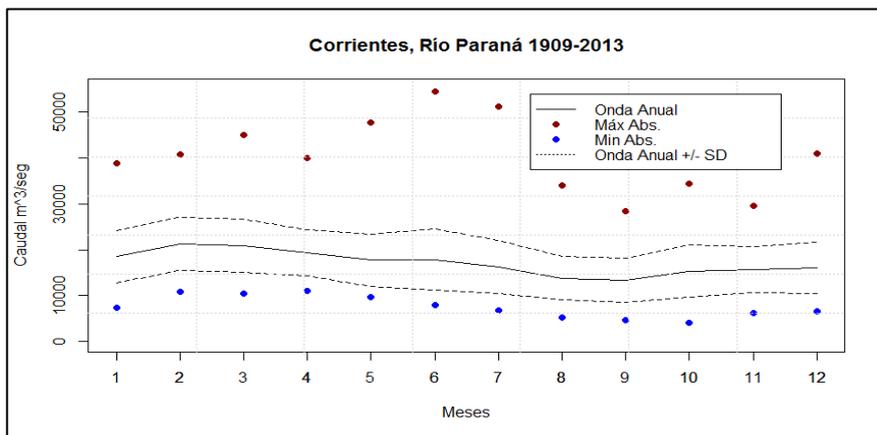
Con respecto al análisis de coherencia espectral, se entiende que al disminuir la distancia la cantidad de ondas que se hacen presentes en las dos estaciones aumenta. Además, se ha podido encontrar el desfase temporal en días de una onda en particular entre dos estaciones.

Finalmente, el análisis exploratorio de las series de caudales y la extensión de sus records permitiría considerar estaciones de referencia de caudal para la profundización de estudios hidro-climatológicos. En el caso del río Paraná resultaría conveniente considerar más de una estación de referencia debido a sus características fisiográficas (Corrientes y Timbúes) y en el caso del río Uruguay Paso de los Libres logra representar el comportamiento del río.

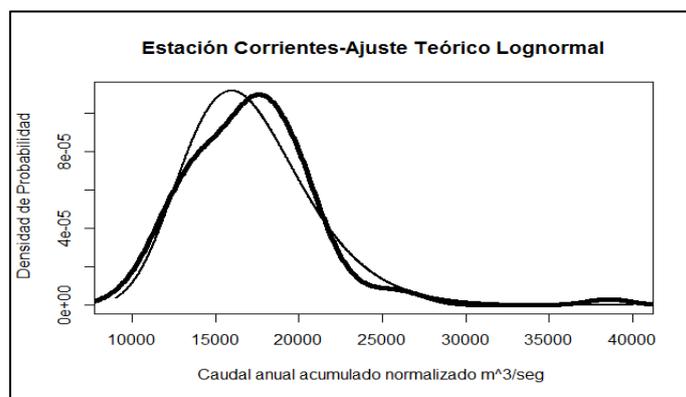
FIGURAS



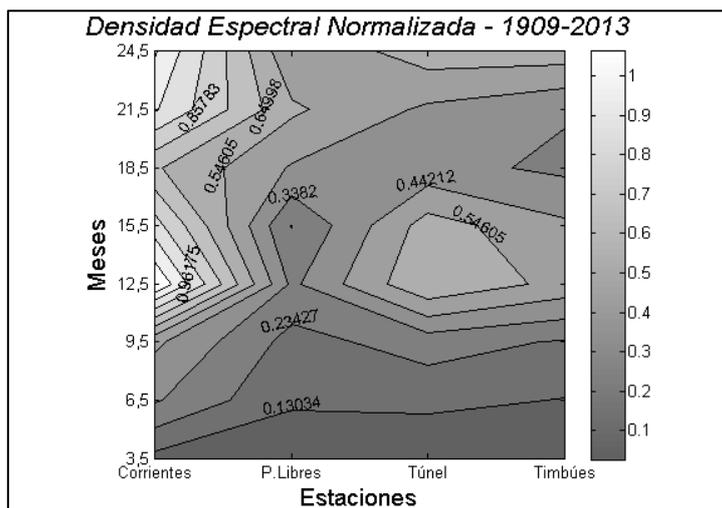
**Figura 1:** Estaciones de referencia ubicadas en la Cuenca del Plata entre 27° to 33° S.



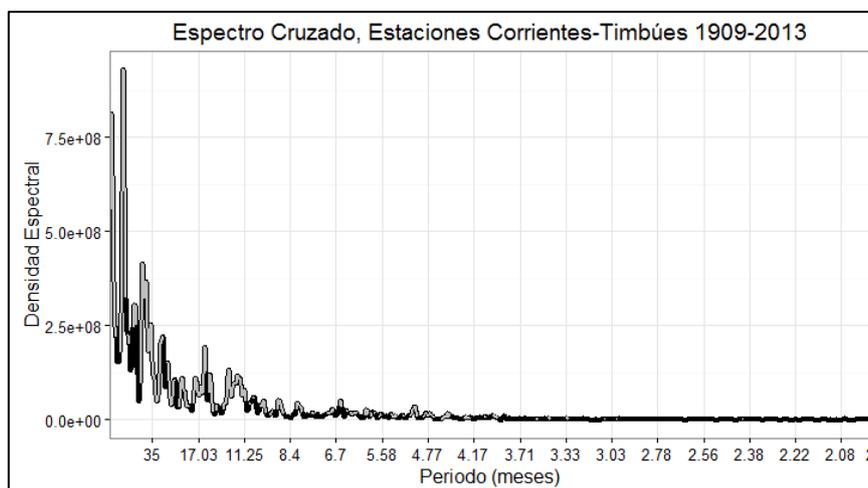
**Figura 2:** Marcha anual, desvíos típicos, máximos y mínimos absolutos en la Estación Corrientes para el período 1909-2013.



**Figura 3:** Distribución de derrame anual normalizado. En línea gruesa la distribución empírica de densidad de probabilidad y en línea delgada la densidad de distribución teórica lognormal, para el período 1909-2013.



**Figura 4:** Isolíneas de energía mediante el método de análisis espectral para 105 años. Periodo 1909-2013, para las estaciones: Corrientes, Paso de los Libres, Túnel Subfluvial y Timbúes (ordenadas según su latitud).



**Figura 5:** La densidad coespectral en línea negra, mientras que la línea gris representa la densidad coespectral significativa para las Estaciones Corrientes y Timbúes en el periodo 1909-2013.

## TABLAS

**Tabla 1:** Valores de “tau” para los pares de estaciones estudiadas

$\tau$	Corrientes	P. de los Libres	Túnel Sub.	Timbues
Corrientes	1	0,29	0,74	0,68
P. de los Libres	0,29	1	0,27	0,27
Túnel Sub.	0,74	0,27	1	0,88
Timbues	0,68	0,27	0,88	1

**Agradecimientos.** Este trabajo fue realizado con el apoyo de los proyectos UBA 2002130300014BA y Foncyt PICT 2012-1507.

## REFERENCIAS

Barros, V.R., *et al.*, 2002. Climate variability over subtropical South America and the South American Monsoon: A review. *Meteorológica*. Vol. 27 N° 1 y 2, pp. 33-57.

Barros, V.R., *et al.*, 2000. Influence of the South Atlantic Convergence Zone and South Atlantic Sea Surface Temperature on Interannual Summer Rainfall in Southeastern South America. *Theory. and Appl. Climatol.* Vol. 67, pp. 123-133.

Barros, V.R., *et al.*, 2006. *Climate Change in the La Plata Basin*. 1st ed. Buenos Aires: CIMA-CONICET-UBA.

Berbery, H. and Barros, V.R., 2002. The hydrologic cycle of the La Plata basin in South America. *Journal of Hydrometeorology*. Vol. 3, pp. 630-645.

Berbery, H. and Collini, E., 2000. Springtime precipitation and water vapor flux convergence over southeastern South America. *Mon. Wea. Rev.* Vol 128, pp. 1328-1346.

Camilloni, I., and Barros, V.R., 2003. Extreme discharge events in the Paraná River and their climate forcing. *Journal of Hydrology*. Vol. 278, pp. 94-106.

Carril, A., *et. al* 1997. Impacts of climate change on the oases of the Argentinean cordillera. *Climate Research*. Vol. 9, pp. 121-129.

Chatfield, C, 1995. *The analysis of Time Series*, 4th edition. Chapman & Hall

Collischonn, W., *et al.* 2001. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? *Journal of Hydrology*. Vol.245, pp. 218-232.

Compagnucci, R.H. and Vargas,W.M., 1998. Inter-annual variability of the Cuyo rivers streamflow in the argentinean andean mountains and ENSO events. *International Journal of Climatology*. Vol. 18, pp. 1593-1609.

Efron, B. and Tibshirani, R.J., 1993. *An introduction to Bootstrap*. Springer-Science+Business Media, B.V.

Foufoula Georgiou, E., and Kumar, P., 1994. *Wavelets in Geophysics*. Academic, San Diego, Calif.

García, N. and Vargas, W., 1995. The spatial variability of runoff and precipitation in the Río de la Plata basin. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 41, 1996.

García, N. and Vargas, W., 1998. The temporal climatic variability in the “Rio de la Plata” basin displayed by the rivers discharges. *Climatic Change*. Vol. 38, pp. 359-379.

Goodman, N.R (1957). Goodman, N.R. *Once the stationary Gaussian process*. Paper N°10, Eng. Statist., Lab. College of Engineering, New York University.

Grimm, A., *et al.*, 2000. Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events. *Journal of Climate*. Vol. 13, pp. 35-58.

Oki, T. and Kanae, S., 2006. Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *Freshwater Resources*. Vol. 313, pp. 1068-1072.

OMM, 1966. Nota técnica N° 79 OMM, *Climatic Change*.

Panofsky (1965). Panofsky, H. A and Brier, G.W. *Some applications of statistics to meteorology*. The Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania. 1-203.

- Popescu, I. *et al.*, 2012. Assessing residual hydropower potential of the La Plata Basin accounting for future user demands. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol.16, pp. 2813-2823.
- Prohaska, H.E., 1976. Climates of Central and South America. *World Survey of Climatology*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. Vol.12, pp. 57-69
- Saurral, R., *et al.*, 2008. Land use impact on the Uruguay River discharge. *Geophysical Research Letters*. Vol. 35, pp. 1-6.
- Siegel, S., 1985. *Nonparametric statistical: for the behavioral sciences*. 1st ed. Tokyo: McGraw-Hill Book Company
- Torrence, C. and Compo, G., 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol.79, pp. 61-78.
- Tucci, C., 2001. Some scientific challenges in the development of South America's water resources. *Hydrological Sciences Journal*. Vol.46, pp. 937-946.
- Vargas, W.M., *et al.*, 2010. Runoff properties of extreme discharges on Paraná and Uruguay rivers. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. Vol. 7, pp. 2949-2973.