

Análisis de la correlación entre las sequías hidro-meteorológicas e hidrológicas en la región central de Argentina

Leticia Vicario^{1,2}, Carlos M. García^{2,3}, José Manuel Díaz Lozada², Gustavo Barchiesi²

¹ Instituto Nacional del Agua-Centro de la Región Semiárida. Vélez Sarsfield y Ambrosio Olmos. (5000) Córdoba.

² Centro de Estudios y Tecnología del Agua. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. Av. Filloy s/n. Ciudad Universitaria (5000). Córdoba, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Mail de contacto: lvicariotm@gmail.com

RESUMEN

Distintos tipos de sequía afectan de manera recurrente a la región central pampeana de la Argentina. Dado su carácter agrícola-ganadero y teniendo en cuenta que allí se localizan importantes ciudades, el análisis y evaluación de las sequías en dicha región adquiere gran relevancia en el plano socio-económico y en el de la planificación estratégica de los Recursos Hídricos. En este trabajo se analiza la correlación entre la ocurrencia y características de sequías meteorológicas y sequías hidrológicas en el área de estudio. Para ello se utilizaron dos series de datos pluviométricos y una serie de caudales medios mensuales seleccionadas como representativas de una cuenca que abarca una importante región de las provincias de Córdoba y Santa Fe, para el período 1980-2009. Se calcularon sobre estas series los índices de sequías meteorológicas e hidrológicas: SPI (por sus siglas en Inglés: Standardized Precipitation Index) y SDI (por sus siglas en Inglés: Streamflow Drought Index), respectivamente. Se observaron bajos niveles de correlación entre las series históricas de los índices SPI y la serie de SDI, aun teniendo en cuenta períodos de desfase entre las mismas. Se logró identificar una de las causas de la decorrelación en la marcada variabilidad de las contribuciones relativas de los principales tributarios a los caudales escurridos en la sección hidrométrica analizada. Esta variabilidad espacial no está representada por los aportes pluviométricos registrados en las estaciones seleccionadas.

Palabras clave: Sequía hidro-meteorológica – Sequía hidrológica – Correlación – Región pampeana central de Argentina.

ABSTRACT

The different types of droughts affect recurrently the central region of Argentina. Due to its agriculture and livestock nature and taking into account that major cities are located in this region, the analysis and evaluation of droughts in this region is very important in economic terms and in strategic planning of water resources. This paper analyzes the correlation between the occurrence and characteristics of meteorological and hydrological droughts in the study area. Rainfall's and average monthly streamflow data series were used which have been recorded during the period 1980-2009 at different locations in a river basin including large areas in the provinces of Córdoba and Santa Fe. The following indexes were computed for meteorological and hydrological droughts: SPI (Standardized Precipitation Index) and SDI (Streamflow Drought Index), respectively. Low correlation has been observed between the index series (SPI at different locations and SDI), even taking into account different lag times. High variability of the relative streamflow contributions of the main tributaries has been identified as one of the reasons of the mentioned decorrelation. This spatial variability is not represented by the two selected rain gages.

Keywords: Hydro-meteorological droughts - Hydrological droughts – Correlation - Central region of Argentina

INTRODUCCIÓN

La variabilidad hidro-meteorológica y particularmente los fenómenos hidrológicos extremos, tales como los distintos tipos de sequía afectan de manera recurrente a la región central pampeana de la Argentina. Dado su carácter agrícola-ganadero y teniendo en cuenta que allí se localizan importantes ciudades, el análisis y evaluación de las sequías en dicha región adquiere gran relevancia en el plano socio-económico y en el de la planificación estratégica de los Recursos Hídricos. La escasez de precipitaciones (valores observados menores a los promedios o valores esperados) en un área y en un período de tiempo determinado constituye un proceso hidrológico extremo denominado sequía meteorológica. Por otra parte la sequía hidrológica se determina por una reducción en las variables que cuantifican la disponibilidad hídrica (caudal, volumen, etc.) en distintos cuerpos de agua (cursos fluviales, embalses, etc.).

Si bien, todos los lugares del planeta están sujetos a la eventual ocurrencia de estos procesos hidro-meteorológicos (Dracup et al., 1980), en particular, los efectos de las sequías has sido observados y documentados en la provincia de Córdoba, que conforma gran parte de la zona de estudio del presente trabajo, donde las condiciones hídricas de los suelos del sur provincial y, consecuentemente, de los cultivos se ha visto deteriorada por la sequía (Ravelo et al., 2008). Se debe tener en cuenta, que el estudio detallado de las sequías en áreas de llanura (como a las que se incluyen en la zona de estudio) son limitados, debido en parte, a las pocas estaciones pluviométricas disponibles y su escasa densidad espacial (Ovalles et al. 2007).

Los autores de este trabajo consideran de gran importancia avanzar en los estudios que faciliten el aporte de información y conocimientos sobre el tema de las sequías, con el fin de constituir un antecedente para futuros trabajos al respecto. En esta línea, el objetivo fundamental de este trabajo es la evaluación de las sequías meteorológicas y de las sequías hidrológicas, a través de indicadores pertinentes definidos en el área de estudio y en el mismo período de tiempo, para realizar luego, un análisis de correlación entre ambos procesos, dado que el área de estudio pertenece a un sistema hidrográfico en llanura. Finalmente se evaluaron los efectos de la disponibilidad de datos hidro-meteorológicos en las conclusiones alcanzadas en este trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

Para poder correlacionar los fenómenos hidrológicos se adopta como área de estudio dentro de la Región central pampeana de la Argentina, la cuenca del río Carcarañá el cual se localiza en el centro-sudeste de la provincia de Córdoba, atraviesa el sur la provincia de Santa Fe para desembocar en el río Paraná. El río Carcarañá, drena un área de 48.150 Km² (Figura 1).

Esta cuenca posee dos grandes sub-cuencas, las mismas pertenecen a los ríos Tercero (o Ctlamochita) y Saladillo. La subcuenca del río Tercero, uno de los principales tributarios del río Carcarañá, constituye un sistema de alimentación pluvial con régimen permanente. Sus principales afluentes son, enunciados de norte a sur: el río Santa Rosa, arroyo Amboy, río Grande, río Quillinzó y río de La Cruz o de los Sauces. Los de mayor recorrido son el Grande, el Santa Rosa y el de la Cruz, de los cuáles el primero es el tributario más importante y está conformado por los arroyos Durazno, Manzano y las Letanías. La subcuenca del río Saladillo (nombre del curso inferior del río Cuarto o Chocancharava), otro de los tributarios principales de la cuenca del Carcarañá, tiene como principales afluentes a los ríos de las Barrancas, San Bartolomé, de la Tapa y Piedra Blanca. El río Cuarto, desde su nacimiento se dirige hacia el sudeste pasando por la localidad de Río Cuarto (Córdoba), ubicada sobre su margen derecha.

Ambos tributarios (Tercero y Saladillo) confluyen en cercanías de la localidad de Monte Buey, dentro de la provincia de Córdoba, continuando su curso con el nombre de río Carcarañá.

Algunos arroyos que se encuentran entre los ríos Tercero y Saladillo escurren en dirección oeste-este y son de carácter arreicos. Uno de los arroyos de mayor importancia en la cuenca baja del río Carcarañá es el Tortugas. Este arroyo fue canalizado para transportar el agua proveniente de desagües pluviales urbanos y del escurrimiento superficial en campos de una amplia región centro-este de la provincia de Córdoba y del oeste de la provincia de Santa Fe.

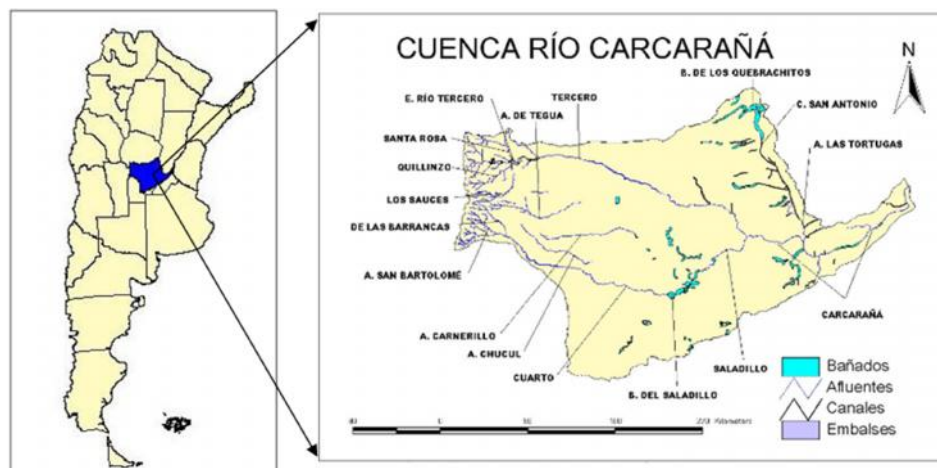


Figura 1.- Ubicación de la cuenca del río Carcarañá. Fuente: Elaboración propia en base a datos del “Atlas digital de los recursos hídricos superficiales de la República Argentina”. Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. Sitio web: www.hidricosargentina.gov.ar

Información utilizada para el estudio de sequías meteorológicas

Se utilizaron datos de lluvias mensuales registradas en el período 1980-2009 pertenecientes a las estaciones pluviométricas de Río Cuarto y Marcos Juárez (Tabla 1 y Figura 2), cuyos registros tienen una calidad y longitud de serie adecuada para este estudio y además han sido verificadas que pertenecen un área hidro-meteorológicamente homogénea dentro de la cuenca de estudio (Vicario et al., 2013). Los datos fueron registrados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Los valores de lluvias de ambas estaciones se promedian (en forma aritmética) para obtener un valor pluviométrico de referencia en la cuenca.

Tabla 1.- Estaciones pluviométricas seleccionadas en la región central de la República Argentina

<i>Estación</i>	<i>Provincia</i>	<i>Latitud [°S]</i>	<i>Longitud [°O]</i>	<i>Altitud [m.s.n.m]</i>
Marcos Juárez (MJ)	Córdoba	32.42	62.10	114
Río Cuarto (RC)		33.07	64.10	421

Metodología utilizada para la evaluación de sequías meteorológicas

Para determinar y evaluar los períodos de sequías meteorológicas, se calculó el índice de precipitación estandarizado (SPI), (McKee et al., 1993) de cada serie temporal y luego se promediaron los valores correspondientes a cada mes. Se utilizó este índice ya que el SPI es el índice actual que sintetiza más apropiadamente las características de los períodos secos y húmedos como fenómeno natural, partiendo del principio de que la precipitación pluvial (lluvia), como parte del ciclo hidrológico, define si existe abundancia o déficit de agua respecto a las condiciones medias de la escala o período que se considere (Velasco y Aparicio, 2004). Este índice considera las probabilidades de ocurrencia de precipitación pluvial para un período dado. Su cálculo consiste en ajustar una serie histórica de precipitación mensual con la función de distribución probabilística Gamma, ya que es la función de distribución que mejor ajusta a la

variable precipitación (Thom, 1966; Young, 1992). Se considera que un período es seco cuando el valor del índice es igual o menor a -1 y a un período húmedo cuando el valor del SPI es igual a mayor a 1, mientras que los valores intermedios entre dichos umbrales representan la ocurrencia de períodos caracterizados como normales. McKee et al (1993), define los valores del SPI y las características de los periodos asociados a esos valores, los cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2.- Valores adimensionales del índice estandarizado de Precipitación y las características de los periodos asociados (SPI)

<i>Índice</i>	<i>Categoría</i>
>2	Extremadamente húmedo
1.99 a 1.50	Muy húmedo
1.49 a 1.00	Moderadamente húmedo
0.99 a -0.99	Normal
-1.00 a -1.49	Sequía moderada
-1.50 a -1.99	Sequía severa
<-2.00	Sequía extrema

Información utilizada para el estudio de sequías hidrológicas

Se utilizaron datos de caudales medios mensuales registrados en el período 1981-2009 pertenecientes a la única estación hidrométrica activa en la cuenca baja del río Carcaraña, denominada Pueblo Andino (Lat.32° 40' 24,00"; Long.60° 51' 57,40"), la cual se encuentra emplazada dentro de la provincia de Santa Fe, a 30km, aproximadamente, antes de la desembocadura de dicho río al Paraná (Figura 2). Los datos pertenecen a la Red Hidrometeorológica Nacional de la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación y están disponibles en el sitio web: www.hidricosargentina.gov.ar.

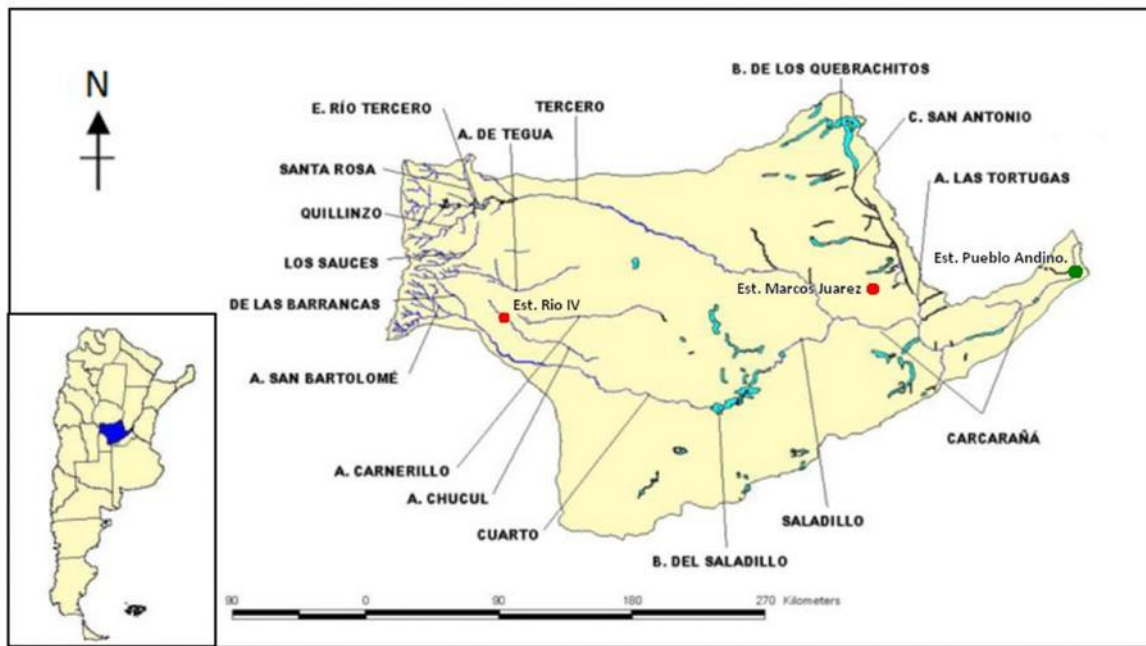


Figura 2: Ubicación de las estaciones pluviométricas Marcos Juárez y Río Cuarto y de la estación hidrométrica Pueblo Andino dentro de la cuenca del río Carcaraña

Metodología utilizada para la evaluación de sequías hidrológicas:

Para analizar las sequías hidrológicas se utilizó el índice de sequía hidrológico SDI (por sus siglas en Inglés: Streamflow Drought Index). La aplicación del SDI es una herramienta que permite realizar de forma sencilla la determinación y clasificación de las sequías que pueden ocurrir en una cuenca. Sin embargo, su cálculo requiere datos de caudal de alta calidad y de longitud suficiente para estimar con precisión la frecuencia de los eventos de sequía (Wagner Gómez; et al., 2012).

Este índice de sequía se basa en los valores de caudales, volúmenes o escurrimientos acumulados durante períodos de tres, seis, nueve y doce meses dentro de cada año hidrológico (Nalbantis, 2008). Estos intervalos de tiempo comienzan el primer mes del año hidrológico considerado (en este caso Julio) y se denominan k1 (hasta Septiembre), k2 (hasta Diciembre), k3 (hasta Marzo) y k4 (hasta Junio). Dichos intervalos permiten analizar, en caso de que se detecten eventos de sequías, la evolución los mismos dentro de cada año hidrológico considerado.

Para estimar este índice se calcula:

$$V_{ik} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{ij}$$

$$i = 1,2, \dots, n; j = 1,2, \dots, 12; k = 1,2,3,4$$

Donde $V_{i,k}$ es el volumen de caudales acumulados para el año hidrológico i en j meses, correspondientes a los respectivos intervalos k .

Siendo:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - V_k}{s_k}$$

Donde $SDI_{i,k}$ el índice de sequía de caudales para el año hidrológico i y el intervalo considerado k . V_k y s_k son, respectivamente, el valor promedio y desvío estándar de todos los valores de V , para el intervalo k considerado, a lo largo de la serie de datos. Los rangos de valores del índice SDI para calificar el nivel de las sequías hidrológicas se muestran en la Tabla 3

Tabla 3 - Valores del índice SDI según los distintos estados de sequía hidrológica

Descripción	Criterio
Sin sequía	$SDI > 0$
Sequía suave	$-1 \leq SDI < 0$
Sequía moderada	$-1,5 \leq SDI < -1$
Sequía severa	$-2 \leq SDI < -1,5$
Sequía extrema	$SDI < -2$

Metodología utilizada para el análisis de correlación entre las sequías hidro-meteorológicas y las sequías hidrológicas

Para establecer la correlación entre las variables de lluvia (P), caudal (Q) y los índices de sequías meteorológicas e hidrológicas (SPI y SDI), respectivamente, se utiliza el coeficiente de Correlación (CC), y se evalúan a través del método de Pearson.

Los coeficientes de correlación miden la fuerza de la relación lineal entre dos series de datos, mediante los valores entre los umbrales -1 a $+1$. Mientras mayor sea el valor absoluto de la correlación, más fuerte es la relación lineal entre las dos variables.

El coeficiente de correlación entre dos variables aleatorias X e Y es el cociente que se muestra en la siguiente expresión:

$$CC_{xy} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y}$$

donde σ_{XY} es la covarianza de (X,Y) y σ_X y σ_Y son las desviaciones típicas de cada una de las variables. Para los valores de coeficiente:

$CC_{xy} = 1$, indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa.

$0 < CC_{xy} < 1$, existe una correlación positiva.

$CC_{xy} = 0$, no existe relación lineal.

$-1 < CC_{xy} < 0$, existe una correlación negativa.

$CC_{xy} = -1$, indica una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa.

Generalidades

El índice SPI se calculó para un intervalo de 12 meses y para el caso del SDI se tomó como intervalo de agregación $k4$ (12 meses), ya que se consideran pasos de tiempo pertinentes para el análisis de las sequías hidrológicas, a nivel de cuenca. Asimismo, el cálculo del índice SDI se hace sobre la base de valores mensuales ordenados en años hidrológicos (Julio – Junio), por lo que, cuando se relaciona una variable con el mencionado índice, se ordena según año hidrológico, de tal manera de hacer posible la correlación directa.

La serie de datos de caudales medios mensuales posee varios meses consecutivos faltantes entre los años 1991/1993 por lo que, en la aplicación de la metodología se descartan los años hidrológicos que requieran de dichos valores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dado que el índice SPI se calcula a partir de las precipitaciones y el índice SDI a partir de los caudales, se determina el Coeficiente de Correlación entre los valores anuales de Precipitaciones y Caudales ($CC1=0,65$) y entre el promedio anual del índice SPI y el SDI calculado para $k4:12$ meses ($CC2=0,61$), de tal manera de mantener el orden de magnitud de las variables correlacionadas y facilitar la representación gráfica de las mismas.

En la Figura 3 y Figura 4 se muestran los gráficos de las variables correlacionadas para cada caso y se destacan los años hidrológicos en los que la evolución temporal de las variables son opuestas entre sí.

Es posible observar, grandes variaciones en el comportamiento de las variables P y Q , donde no necesariamente, cuando existe un incremento de lluvia en las estaciones seleccionadas en la cuenca se ve reflejado en un incremento de caudales en la estación de Pueblo Andino. Se destaca el período a partir del año 2000/2001 hasta 2003/2004, aproximadamente, en el que las variaciones en los valores de lluvia fueron de gran magnitud, mientras que en el mismo período de casi 4 años, los registro de caudales no sufrieron cambios importantes.

Utilizando el mismo procedimiento, también se determinaron los CC para la variable P con sus respectivos Q desfasados 3, 6, 9 y 12 meses, los cuales disminuyeron notablemente, estando en todos los casos en el orden de $0,10$.

De la misma manera, se observa para el caso de los índices SPI y SDI, es decir que la ocurrencia de sequías meteorológicas (definidas en base a los registros de las dos estaciones seleccionadas), no implican necesariamente la ocurrencia de una sequía hidrológica o que sucedan con una magnitud relacionada directamente a la intensidad de las mismas.

Es posible observar que los CC entre las variables seleccionadas no es posible establecer en forma directa funciones que permitan inferir un índice en función del otro en lo que a los distintos tipos de sequías se refiere. En este caso, se considera que una de las causas factibles de la falta de correlación entre las precipitaciones y los caudales y entre las sequías meteorológicas e hidrológicas, se debe a la combinación de dos aspectos fundamentales como lo son la extensión de la cuenca (por lo que puede estar sometida a eventos hidrometeorológicos con diferente intensidad en la cuenca) y la escasez de información hidro-meteorológica con la longitud, calidad y cobertura espacial adecuadas para estudios de sequías. Para evaluar la mencionada variabilidad espacial se analizaron aforos realizados por el grupo de investigadores del CETA (Centro de Estudios y Tecnología del Agua) de la Universidad Nacional de Córdoba y reportados por Barchiesi (2014). Este autor muestra los resultados de campañas de aforos realizadas en distintas secciones del río Carcarañá, y compara los caudales aforados observados en los distintos tributarios y en la sección de aforo utilizada en este trabajo (Pueblo Andino). Además de la importancia de los ríos Tercero y Saladillo, este autor observó una gran influencia del aporte proveniente del arroyo Tortugas. Este arroyo transporta el agua proveniente de desagües pluviales urbanos y del escurrimiento superficial en campos de la región centro-este de la provincia de Córdoba. Barchiesi (2014) concluye que existe una gran variabilidad de las contribuciones relativas de los tributarios y que en época de lluvias el aporte del arroyo Tortugas al río Carcarañá puede presentar similar magnitud, y en algunos casos mayor, que las contribuciones que realizan los dos tributarios principales (ríos Tercero y Saladillo). Esta variabilidad en las contribuciones relativas de los tributarios (en una cuenca de gran extensión) no está representada por los aportes pluviométricos registrados en las estaciones seleccionadas.

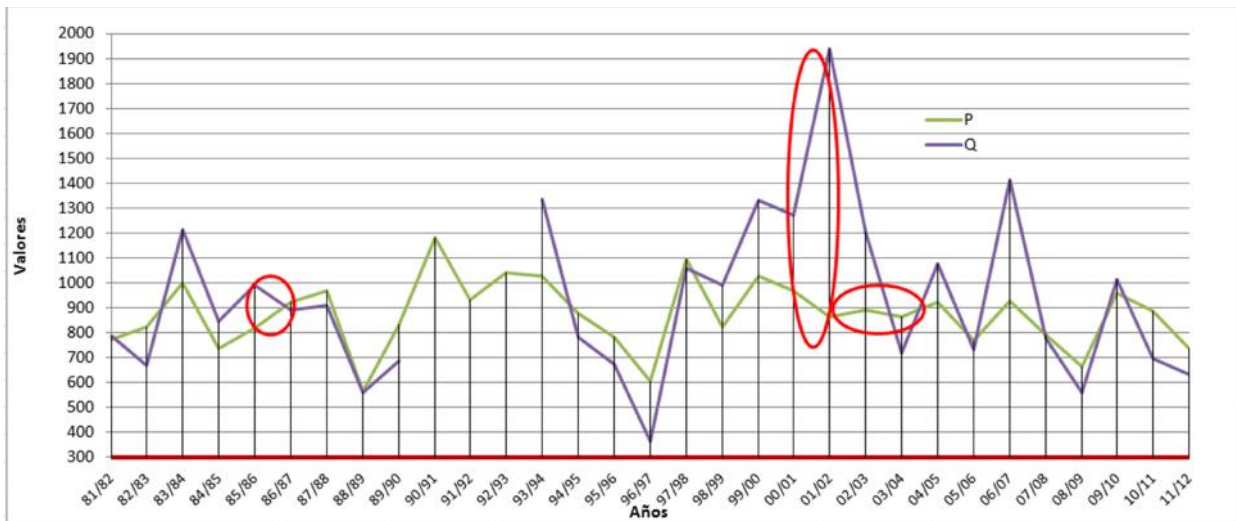


Figura 3.- Evolución temporal de las variables P y Q anuales (1981/1982 – 2011/2012). Círculo rojo: se destacan los años hidrológicos en los que la evolución de las gráfica son opuestas entre sí

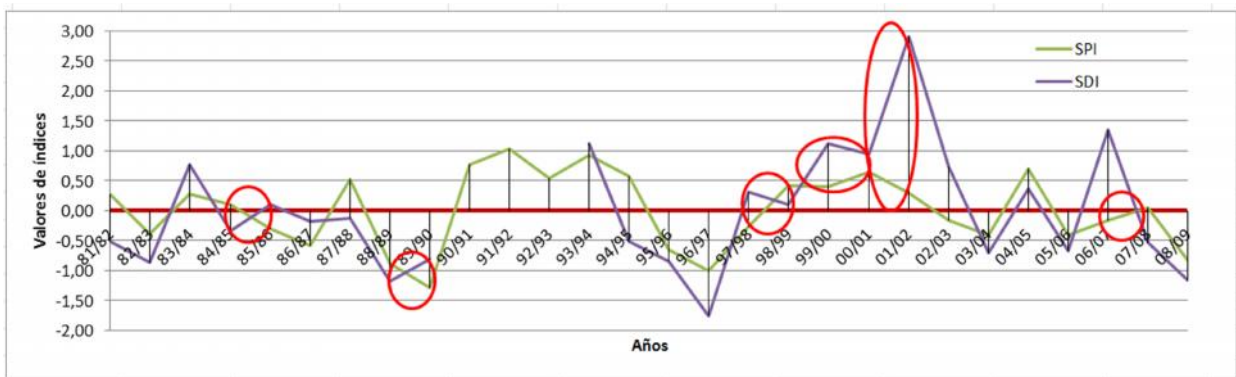


Figura 4.- Evolución temporal de los índices SPI (12 meses) y SDI (k4:12 meses) (1981/1982 – 2011/2012). Círculo rojo: se destacan los años hidrológicos en los que la evolución de las gráfica son opuestas entre sí

CONCLUSIONES

En este trabajo fue posible evaluar y correlacionar las variables hidrológicas de lluvia y caudales y los tipos de sequías meteorológicas e hidrológicas a través de índices pertinentes, considerando que el área de estudio (cuenca del río Carcarañá) pertenece a un sistema hidrográfico de llanura. Se determinaron los Coeficientes de Correlación para el primer caso de 0.65 (relacionando lluvia y caudales) y para el caso de las sequías (hidrometeorológicas e hidrológicas) de 0.61.

Se observaron grandes variaciones en el comportamiento de las variables P y Q, donde no necesariamente, cuando existe un incremento o descenso de lluvia en las estaciones representativas de la cuenca se ve correspondido con el comportamiento de los caudales en la estación de Pueblo Andino. Tampoco se observa una proporcionalidad notable en las magnitudes de los registros para un mismo período de ambas variables.

Se determinaron los CC para la variable P con sus respectivos Q desfasados 3, 6, 9 y 12 meses, los cuales disminuyeron notablemente, estando en todos los casos en el orden de 0,10.

Para el caso de los índices SPI y SDI, se determinó que la ocurrencia de sequías meteorológicas, (definidas en base a la información disponible) no implica necesariamente la ocurrencia de una sequía hidrológica o que sucedan con una magnitud relacionada directamente a la intensidad de las mismas.

En este caso, se considera que una de las causas factibles de la decorrelación entre las precipitaciones y los caudales y entre las sequías meteorológicas e hidrológicas, corresponde a la combinación de dos aspectos fundamentales como lo son la extensión de la cuenca y la escasez de información hidro-meteorológica con la longitud y calidad adecuada para estudios de sequías.

Estudios anteriores basados en mediciones y aforos muestran que el caudal medido en la sección hidrométrica de Pueblo Andino se ve influenciado por la marcada variabilidad de las características de las precipitaciones que suceden en las sub-cuencas del río Carcarañá y por ende en las contribuciones relativas de los principales tributarios, (ríos Tercero y Saladillo y arroyo Tortugas), que aportan superficialmente caudales a la sección hidrométrica analizada.

REFERENCIAS

- Barchiesi, Gustavo M. (2014).** Cuantificación y caracterización del escurrimiento superficial en la cuenca del río Carcarañá. Informe técnico final de Práctica Supervisada de la carrera de Ingeniería Civil. FCEfyN-UNC.
- Dracup, J.A, Lee, K.S. y Paulson, E.G. jr. (1980).** "On the definitions of drought". WRR. Vol.16, núm. 2, pp. 297-302.

McKee, T.B., N. J. Doesken and J. Kliest.(1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales". In Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society. Boston, MA. 179-184.

Nalbantis, I. (2008). "Evaluation of a Hydrological Drought Index". *European Water* 23/24: 67-77

Ovalles, F., Cortez, A., Rodríguez, M., Rey, J. y Cabrera-Bisbal, E. (2007). "Variación geográfica del impacto del cambio climático en el sector agrícola en Venezuela". I Congreso Venezolano de Agrometeorología y V Reunión Latinoamericana de Agrometeorología. Maracay, Venezuela.

Ravelo, A.C., Planchuelo, A., Zanvettor, R., Barbeito, A., Marraco, G. (2008). "Monitoreo, evaluación e impacto de la sequía en la provincia de Córdoba". Boletín agroclimático de la provincia de Córdoba.

Subsecretaría de Recursos Hídricos. Ministerio de Obras Públicas de la Nación (2014). Cuencas y regiones hídricas superficiales. Sitio web: <http://www.hidricosargentina.gov.ar>

Thom, H. (1966). "Some Methods of Climatological Analysis". WMO Technical Note Number 81, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 53 pp.

Velasco I. y Aparicio, J. (2004). "Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo/Grande". Ingeniería Hidráulica en México, vol. XIX, num 3, pp. 37-53.

Vicario, L., García, C.M., Teich, I. (2013). Identificación y evaluación de zonas hidro-meteorológicamente homogéneas en la Región central de la Argentina. Primer Congreso Iberoamericano de Protección, Gestión, Eficiencia, Reciclado y Reúso del Agua. Córdoba. Argentina. Mayo, 2013.

Wagner Gómez A.I., Ortiz Gómez R. y Barragán Barrios M.C. Evaluación de la sequía hidrológica en la cuenca Lerma Chapala. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México, Noviembre 2012

Young, K.C. (1992). "A Three-Way Model for Interpolating for Monthly Precipitation Values". *Monthly Weather Review*, 120, pp. 2561-2569