

**PRIMER CONGRESO IBEROAMERICANO DE PROTECCIÓN, GESTIÓN,
EFICIENCIA, RECICLADO Y REÚSO DEL AGUA**

**PRIMER SEMINARIO DE UNIVERSALIZACIÓN DEL ACCESO AL AGUA APTA
PARA EL CONSUMO HUMANO**

**IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE ZONAS HIDRO-
METEOROLÓGICAMENTE HOMOGÉNEAS EN LA REGIÓN CENTRAL DE LA
ARGENTINA**

Leticia Vicario^{1,2}, Carlos M.García^{1,2,3}, Ingrid Teich^{3,4}

¹Centro de Estudios y Tecnología del Agua. Universidad Nacional de Córdoba.

Av. Filloy s/n. Ciudad Universitaria. Cba., Rep. Argentina. Tel/fax: +54-0351-4334446.

E-mail: lvicariotm@gmail.com

²Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba

³Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

⁴Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.

RESUMEN

La variabilidad hidro-meteorológica y particularmente los fenómenos hidrológicos extremos afectan de manera recurrente a varias regiones de la República Argentina. Dado el carácter agrícola-ganadero de la región central de ese país y teniendo en cuenta que en dicho territorio se localizan importantes ciudades, el conocimiento y evaluación de dicha variabilidad adquiere gran relevancia en el plano económico y en la planificación estratégica de los recursos hídricos, entre otros aspectos. En este trabajo se aplicaron criterios y técnicas estadísticas de análisis y agrupamiento de localizaciones sobre la variable de lámina de lluvia anual, y se caracterizaron los períodos críticos extremos (secos y húmedos) en el área de estudio mediante el índice estandarizado de precipitaciones (SPI). Para ello se utilizaron series de datos pluviométricos registrados en estaciones ubicadas en las provincias de Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos, durante el período 1980-2009. Se lograron identificar tres grupos de estaciones con comportamiento similar (tempo- espacial) en lo que se refiere a los procesos hidro-meteorológicos.

ABSTRACT

Hydro-meteorological variability and extreme hydrologic processes affect several regions of Argentina. In the central region of the country, where agriculture and livestock rearing are the main activities, the analysis and assessment of these phenomena becomes relevant for the economy and strategic planning. Moreover, some of the country's major cities are located in this region. In this paper different criteria and statistical multivariate analysis were performed on series of annual rainfall depth and extreme periods (abnormally dry or abnormally wet) have been characterized in the study area using the Standardized Precipitation Index (SPI). Rainfall time series recorded (period 1980-2009) at rain gage stations located in the provinces of Cordoba, Santa Fe and Entre Rios have been analyzed. Three groups of stations with a similar rainfall behavior were identified, which allows the determination of spatial scales or sub-areas influenced by similar hydro-meteorological process.

PALABRAS CLAVES: Región central argentina - Agrupamiento de estaciones - SPI

INTRODUCCIÓN

La variabilidad hidro-meteorológica y particularmente los fenómenos hidrológicos extremos afectan de manera recurrente a varias regiones de la República Argentina. La escasez de precipitaciones (valores observados menores a los esperados o medios) en un área y en un período de tiempo determinado constituye un proceso hidrológico extremo denominado “sequía”, mientras el aumento de la intensidad o monto precipitado durante tormentas atípicas para una región, puede provocar excesos derivados en crecidas en cuerpos de aguas superficiales y/o inundaciones. Todos los lugares del planeta están sujetos a la eventual ocurrencia de estos procesos (Dracup et al., 1980). Estos fenómenos pueden ser estudiados utilizando información de diversas variables, tales como la precipitación o valores característicos de la escurrentía superficial.

El análisis de los períodos hidrológicos críticos, es requerido para realizar la planificación y manejo de los recursos hídricos en aquellas zonas donde gran parte de la actividad económica depende del aprovechamiento de esos recursos hídricos. En particular, los efectos de las sequías se ven reflejados en la provincia de Córdoba, donde las condiciones hídricas de los suelos del sur provincial y, consecuentemente, de los cultivos han comenzado a deteriorarse rápidamente por la sequía (Ravelo et al., 2008). El estudio 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) .

Vicario (2008) recomienda que para favorecer el desarrollo de estudios certeros sobre fenómenos críticos, en lo que a recursos hídricos se refiere y debido a la escasez de registros de las variables representativas en la zona de estudio, es necesario implementar una red hidro-meteorológica que permita conformar una base de datos lo suficientemente completa y confiable para tal fin.

Ante la situación de escasez de información, se destaca la importancia de efectuar un análisis regional de la información de las estaciones de superficie disponible, para identificar zonas hidro-meteorológicamente homogéneas y de caracterizar los períodos a través de un indicador pertinente; lo que da origen a los objetivos fundamentales del presente trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Información utilizada:

Se utilizaron datos de lluvias mensuales registradas en el período 1980-2009 pertenecientes a estaciones hidro-meteorológicas de superficie de la región pampeana central de la Argentina. Los datos fueron registrados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la Republica Argentina, y están disponibles en el Sistema Integrado de Información Agropecuaria (SIIA, sitio web: <http://www.siiia.gov.ar/>). Se incluyeron aquellas estaciones con datos para el período de estudio y con un porcentaje máximo de datos faltantes del 5%. Los datos faltantes para cada mes se completaron con los valores promedios históricos de ese mes para la estación analizada, de manera de minimizar los efectos de esta discontinuidad sobre la media de la serie, y sobre el posterior cálculo del índice de sequía. Así, se seleccionaron 15 estaciones pluviométricas (cuyas localizaciones se detallan en la Tabla 1), de las cuales 7 se encuentran ubicadas en la provincia de Córdoba, Argentina (en las localidades de Córdoba, Laboulaye, Marcos Juárez, Pilar, Río Cuarto, Villa Dolores y Villa María de Río Seco), 5 en la provincia de Santa Fe (en las localidades de Ceres, El Trébol, Rosario, Sauce Viejo y Venado Tuerto) y 3 en la provincia de Entre Ríos (en las localidades de Gualaguaychú, Paraná y Concordia). Dado que el período de estudio incluye 30 años, se trabajó en cada estación con una serie de 360 valores de lluvia correspondientes a los 12 meses de cada uno de los años incluidos en el período de estudio.

Análisis regional: identificación de zonas hidro-meteorológicamente homogéneas

Para definir subgrupos de estaciones pluviométricas que caractericen zonas homogéneas respecto a sus características hidro-meteorológicas que permitan realizar un análisis regional de las sequías, se implementaron dos metodologías que fueron utilizadas en forma complementaria: a) basada en la similitud de las características físicas de las localizaciones donde están instaladas las estaciones (Pierrehumbert, 1977); y b) basada en la similitud del comportamiento de las series de datos de lluvia anual precipitada (mediante análisis estadísticos multivariados). Para la primera alternativa metodológica se identificaron grupos según el criterio definido por Pierrehumbert (1977), el cual establece que los datos de una estación pluviométrica se pueden suponer representativos de otros sitios si se cumplen las siguientes condiciones:

- El terreno es similar en un radio de 5 km de la localización de cada estación;
- Los sitios están ubicados en la misma vertiente hidrológica;
- La diferencia de nivel topográfico entre sitios es menor que 200 m;
- Los sitios se encuentran a una distancia no mayor a 150 Km.
- La diferencia de lluvia media anual entre sitios es menor a 100 mm, si ésta es menor a 1000 mm;
- La diferencia de lluvia media anual es menor que un 10 % en zonas más húmedas.

Para implementar la segunda alternativa metodológica, se construyeron series de lluvia media anual para cada estación y se realizó un análisis de componentes principales (ACP). Esta técnica permite explorar las relaciones existentes entre las observaciones multidimensionales mediante ordenaciones de las mismas sobre planos que son óptimos para ordenar las observaciones y analizar interdependencias. En esencia, en el ACP se extraen sucesivos componentes desde una matriz de similitudes (o distancias) entre las observaciones (15 estaciones pluviométricas) calculada a partir de múltiples variables (30 valores de totales de lluvias anuales en el período de estudio). Esos componentes son usados como ejes para la representación gráfica de los objetos. En la ordenación, cada unidad de estudio es ubicada sobre uno o más ejes tal que su posición relativa refleja las similitudes y/o distancias entre ellos (Gabriel, 1971). Específicamente, para identificar grupos se realizó un análisis de Conglomerados. Esta técnica permite asociar las observaciones de un conjunto, en un número determinado de grupos, basada en el concepto de distancia o similitud entre las observaciones. En este trabajo se utilizó la distancia Euclídea (d) debido a que es un método sencillo y recomendable para los casos en los que las variables estén medidas en las mismas unidades y sean homogéneas. Se utilizó el método de Encadenamiento promedio (Sokal y Michener, 1958), ya que es uno de los métodos más simples y que ha presentado resultados eficaces en numerosos casos en los que se ha aplicado. Este método consiste en, dados dos conglomerados, promediar todas las distancias entre pares de objetos en los que cada uno de estos objetos, pertenezca al otro conglomerado del de su par. Es posible representar los resultados con las distintas etapas de agrupamiento a través de un gráfico, denominado dendrograma. Ambos análisis se realizaron con el programa Infostat (Di Rienzo et al, 2011).

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

| Estación | Provincia | Latitud [°S] | Longitud [°O] | Altitud [m.s.n.m] |
|--------------------------------|--------------------------|--------------|---------------|-------------------|
| Córdoba (CBA) | Córdoba, Argentina | 31.19 | 64.10 | 474 |
| Laboulaye (LAB) | | 34.08 | 63.20 | 137 |
| Marcos Juárez (MJ) | | 32.42 | 62.10 | 114 |
| Pilar (PI) | | 31.40 | 63.50 | 338 |
| Río Cuarto (RC) | | 33.07 | 64.10 | 421 |
| Villa Dolores (VDOL) | | 31.57 | 65.10 | 569 |
| Villa María de Río Seco (VMRS) | | 29.54 | 63.40 | 341 |
| Ceres (CE) | Santa Fe, Argentina | 29.53 | 61.60 | 88 |
| El Trébol (TR) | | 32.30 | 61.40 | 96 |
| Rosario (ROS) | | 32.55 | 60.50 | 25 |
| Sauce Viejo (SV) | | 31.42 | 60.50 | 18 |
| Venado Tuerto (VT) | | 33.40 | 61.60 | 112 |
| Gualectuaychú (GUAL) | Entre Ríos, Argentina | 33.00 | 58.40 | 21 |
| Paraná (PAR) | | 31.47 | 60.30 | 78 |
| Concordia (CON) | | 31.18 | 58.00 | 38 |

Análisis de los períodos hidro-meteorológicos:

Una vez identificadas las sub-áreas pluviométricamente homogéneas, para evaluar el comportamiento de los períodos hidrometeorológicos, observando la variabilidad interanual de los mismos, se calculó el índice de precipitación estandarizado (SPI), (McKee et al., 1993) de cada serie temporal y luego se promedió a nivel de sub-área. 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 períodos 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 períodos asociados (SPI)

| Índice | Categoría |
|---------------|-----------------------|
| >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 |

Asimismo, con la finalidad de observar la variabilidad del índice de sequía SPI y representar adecuadamente su tendencia, se calcularon los promedios móviles con intervalos constantes de 12 períodos mensuales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis regional: identificación de zonas hidro-meteorológicamente homogéneas

Según el criterio de Pierrehumbert (1977), la estación de Villa Dolores no es agrupable a ninguna de las estaciones seleccionadas para este trabajo, debido a que no cumple con: a) la condición de la diferencia en nivel topográfico, b) la condición de diferencia en la pluviometría anual, c) sitios ubicados en la misma vertiente hidrológica. Esto es coherente ya que dicha estación está emplazada en la zona serrana de la provincia de Córdoba. De igual manera, se estima que la estación de Concordia no es representativa de ningún subgrupo ya que presenta una diferencia notable en la variable de precipitación, respecto de las estaciones consideradas. La evaluación del resto de las características físicas sugeridas por Pierrehumbert (1977) se realizó de manera complementaria al análisis estadísticos multivariados de la variable de lluvia media anual, de tal manera de validar la coherencia en los agrupamientos de estaciones realizados.

La Figura 1 muestra el ordenamiento de las estaciones pluviométricas de la región central de Argentina en el plano definido por las dos primeras componentes principales obtenidas del ACP realizado sobre los datos de lluvia anual entre 1980 y 2009. Los distintos colores corresponden a estaciones ubicadas en distintas provincias. Los dos primeros ejes obtenidos mediante el análisis de componentes principales explican un 75,1% de la variabilidad observada entre estaciones respecto a las medias pluviométricas anuales. En la Figura 1, se observa que las estaciones de Villa Dolores y Concordia están alejadas del resto de los casos del conjunto, respecto a sus características pluviométricas, lo cual concuerda con los resultados obtenidos mediante el criterio de Pierrehumbert (1977). Por esta razón, ambas estaciones fueron descartadas en los análisis posteriores. Las estaciones de la provincia de Córdoba presentan lluvias medias anuales inferiores respecto de las estaciones de la provincia de Entre Ríos y en algunos casos se acercan al comportamiento de las estaciones de Santa Fe.

Dado el número de estaciones y según las características físicas y pluviométricas de las mismas, se definió que la cantidad óptima de zonas o sub-áreas homogéneas es tres. El análisis de conglomerados identificó los siguientes tres grupos: el grupo 1 está conformado por las estaciones de Sauce Viejo, Rosario, Paraná y Gualaguaychú; el grupo 2 por las estaciones de Villa María de Río Seco, Pilar y Córdoba y por último, el grupo 3, conformado por las estaciones de Río Cuarto, Laboulaye, Venado Tuerto, Marco Juárez, el Trébol y Ceres. En la Figura 2 se muestra el dendrograma obtenido mediante el análisis de Conglomerados y en la Figura 3 se identifican en un mapa las estaciones que conforman cada una de las agrupaciones o sub-áreas.

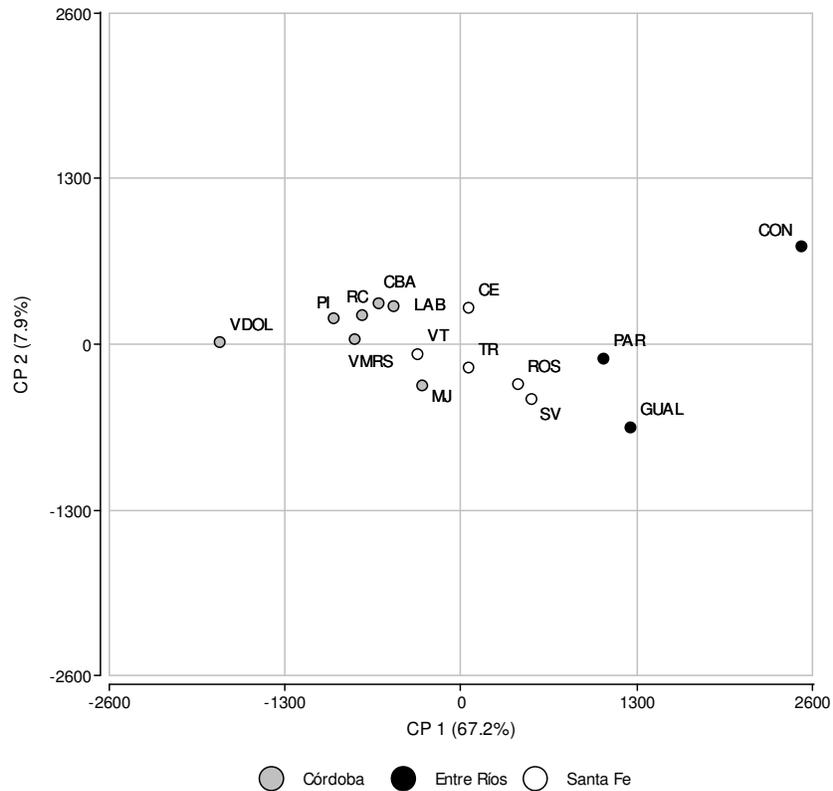


Figura 1.- Ordenamiento de las estaciones pluviométricas de la región central de Argentina en el plano definido por las dos primeras componentes principales obtenidas del ACP realizado sobre los datos de lluvia anual entre 1980 y 2009. Los distintos colores corresponden a estaciones ubicadas en distintas provincias.

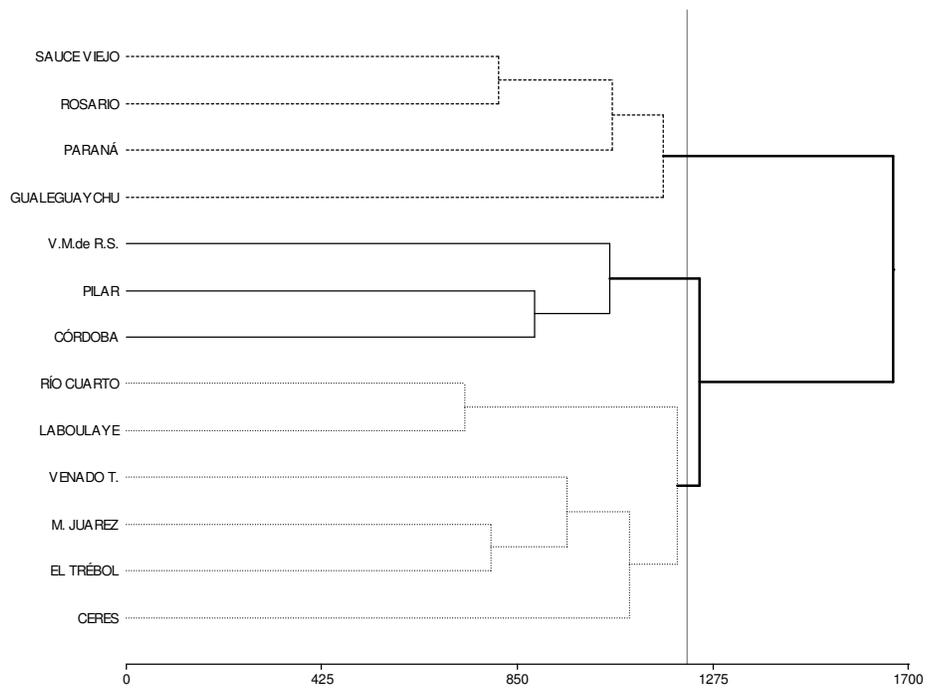


Figura 2.- Dendrograma obtenido mediante el análisis de conglomerados realizado sobre los datos de lluvia anual entre los años 1980 y 2009 de las 13 estaciones analizadas. Se detalla la distancia a la cual se separan los tres grupos obtenidos.

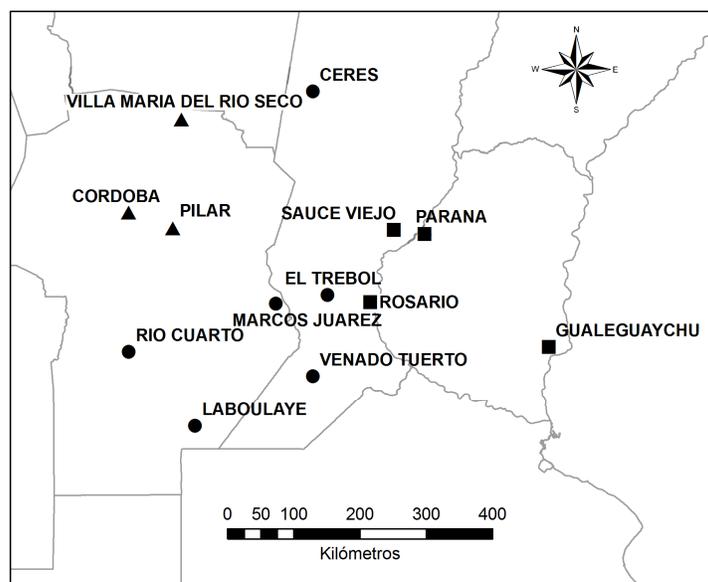


Figura 3.- Ubicación de las estaciones que conforman cada una de las agrupaciones, distinguidas según:
Grupo 1: cuadrado, Grupo 2: triángulo y Grupo 3: círculo

Análisis de períodos hidro-meteorológicos:

Una vez agrupadas las estaciones representativas en cada sub-área se analizaron los períodos hidro-meteorológicos de manera conjunta para cada uno de los tres grupos definidos. Se observa que las estaciones que conforman cada uno de los grupos detallados presentan similar comportamiento entre sí, en cuanto a la ocurrencia de períodos secos, normales y húmedos. En la Figura 4 se muestran los valores promedios del índice SPI de cada grupo de estaciones

En el caso del grupo 1 (Sauce Viejo, Rosario, Paraná y Gualeguaychú), todas presentaron períodos de sequías severas y/o extremas en los años 1989 y 2008-2009. Además se registraron dos eventos extremos de consideración para el caso de la estación de Rosario en el año 1983 y en la estación de Paraná en 1997. Dentro del grupo 2 (Villa María de Río Seco, Pilar y Córdoba) se observaron períodos de sequías severas y/o extremas entre los años 1988 - 1990 y 2008 - 2009 para todos los casos, también en los años 1994 a 1996 y 2003-2004 a excepción de la estación de Córdoba que presentó sequías moderadas a severas. Con respecto a las estaciones que conforman el grupo 3 (Río Cuarto, Laboulaye, Venado Tuerto, Marcos Juárez, El Trébol y Ceres), se observaron, como en el resto de la región de estudio, períodos con sequías severas y/o extremas alrededor de los años 1989 y 2008-2009 en todas las estaciones; desde el año 1996 hasta el 2006 se registraron distintos eventos de sequías intensas en algunas de las estaciones que conforman el grupo.

Cabe destacar que en los tres grupos de estaciones pluviométricas dentro del área de estudio se observaron sequías severas o extremas alrededor de los años 1989, 1995/1997 y 2008. Lo que indicaría un importante déficit hidro-meteorológico (sequía) a nivel regional en la segunda mitad de cada década. Además, a través del análisis del Índice SPI promedio de cada grupo de estaciones incluido en la Figura 4, es posible observar que a nivel regional y a partir del año 1998 aproximadamente, los ciclos húmedos son más importantes en cuanto a su intensidad.

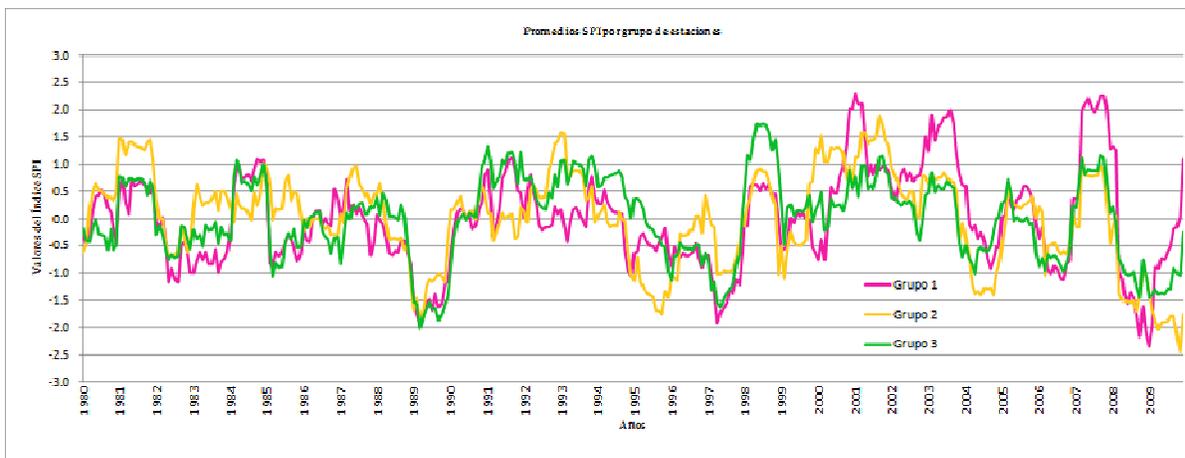


Figura 4.- Gráfico de los valores promedios del índice SPI (para 12 meses) de cada uno de los grupos de estaciones o sub-áreas. Grupo 1: Magenta, Grupo 2: Amarillo y Grupo 3: Verde

Para identificar más claramente esta situación se graficaron en la Figura 5 las líneas de tendencia obtenidas a partir de la media móvil de 12 meses de las series de datos de valores promedios del índice SPI de cada grupo de estaciones. Se observa que hasta el año 1997 aproximadamente, el Grupo 1 y 3 se comportan de manera similar. No obstante a partir del año '98 hasta el final de la serie, las tendencias de los 3 grupos son compatibles entre sí en cuanto a la ocurrencia de ciclos húmedos, normales o secos, pero se destaca que el Grupo 1 presenta ciclos húmedos más intensos que el resto de los grupos.

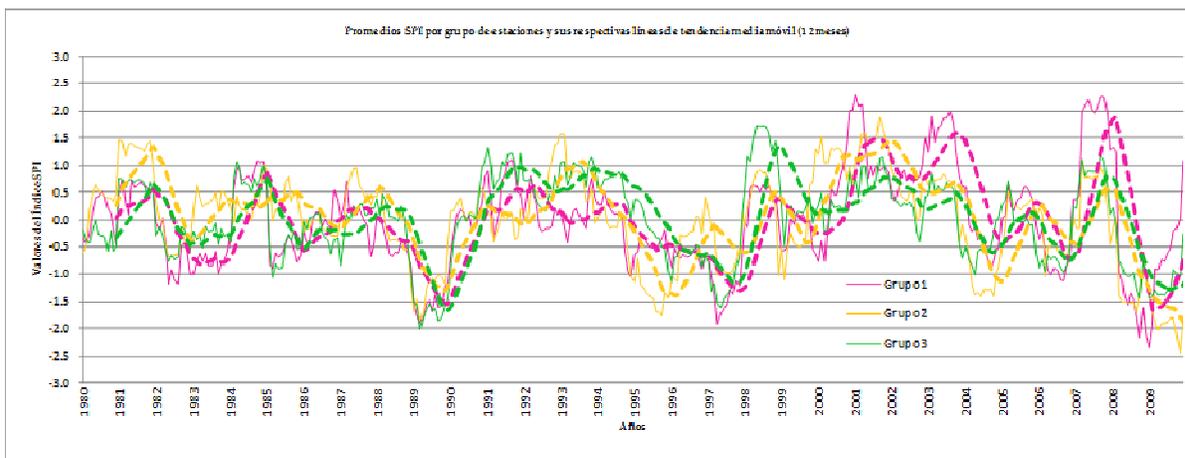


Figura 5.- Gráfico de los valores promedios del índice SPI de cada uno de los grupos de estaciones y sus respectivas líneas de tendencia obtenidas a partir de la media móvil de 12 meses (líneas de puntos). Grupo 1: Magenta, Grupo 2: Amarillo y Grupo 3: Verde

CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza la variabilidad espacial de las sequías hidro-meteorológicas en la región Central de Argentina (extensa región donde predominan los llanos). Se lograron identificar grupos de estaciones o localizaciones con comportamiento similar en lo que se refiere a los procesos pluviométricos, lo que permite identificar escalas espaciales o sub-áreas de influencia de los fenómenos hidro-meteorológicos.

Para agrupar las estaciones se implementó un criterio de clasificación en el cual se complementa un análisis que tiene en cuenta las características físicas del lugar donde se localizan las estaciones pluviométricas y análisis estadísticos multivariados sobre la variable lluvia media anual en cada

localización. En primera instancia se descartaron como representativas de la región de estudio las estaciones de Villa Dolores (provincia de Córdoba) y Concordia (Entre Ríos) ya que no tienen correspondencia con el resto de las estaciones de la región. Se conformaron finalmente tres sub-áreas homogéneas estadísticamente considerando su comportamiento pluviométrico.

Tomando como referencia el índice SPI (12 meses) se corrobora que las estaciones pertenecientes a cada uno de los grupos conformados poseen un comportamiento similar respecto de los períodos de sequías. Existieron sequías severas o extremas alrededor de los años 1989, 1995/1997 y 2008, lo que indicaría un posible déficit hidro-meteorológico a nivel regional en la segunda mitad de cada década. Hacia el Este del área de estudio se observan períodos húmedos más intensos, a partir de fines de la década del '90.

REFERENCIAS

- Di rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W.** (2011) InfoStat versión. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- 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.
- Gabriel, K.R.**(1971). "Biplot display of multivariate matrices with application to principal components analysis". *Biometrika*, 58: 453-467.
- 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.
- 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.
- Pierrehumbert, C. L.**(1977). *Rainfall Intensity-Frequency-Duration Estimation*. Capítulo 2 en: Australian Rainfall and Runoff. The Institution of Engineers. Canberra, Australia.
- 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*.
- Sokal, R.R.; Michener, C.D.** (1958). "A Statistical Methods for Evaluating Systematic Relationships". *University of Kansas Science Bulletin*, 38: 1409-1438.
- 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.** (2008). *Evaluación de las sequías hidro-meteorológicas en la cuenca del dique San Roque, Córdoba*. Tesis de Maestría. FCEFYN. Universidad Nacional de Córdoba.
- Young, K.C.** (1992). "A Three-Way Model for Interpolating for Monthly Precipitation Values". *Monthly Weather Review*, 120, pp. 2561-2569