

Caracterización de las sequías meteorológicas en la región central de la Argentina

• Leticia Vicario* • Carlos M. García • Ingrid Teich • Juan Carlos Bertoni •
• Andrés Ravelo • Andrés Rodríguez •
Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

*Autor de correspondencia

Resumen

Vicario, L., García, C. M., Teich, I., Bertoni, J. C., Ravelo, A., & Rodríguez, A. (enero-febrero, 2015). Caracterización de las sequías meteorológicas en la región central de la Argentina. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(1), 153-165.

Los procesos de sequía de distintas intensidades afectan de manera recurrente varias regiones de la República Argentina. Dado el carácter agrícola-ganadero de la región central pampeana de ese país, el análisis y la evaluación de las sequías en dicha región adquiere gran relevancia en el plano económico y en el de la planificación estratégica, entre otros. Esta situación es aún más relevante si se menciona que en tal territorio se localizan algunas de las ciudades más importantes del país. En este trabajo se analiza la variabilidad espacial de las sequías-meteorológicas en la región de estudio mediante el índice estandarizado de precipitaciones (SPI) para subáreas y en el ámbito regional, teniendo en cuenta, además, la influencia del fenómeno climático ENSO. Para identificar subáreas de influencia de los fenómenos de déficit hidrometeorológico, se aplicaron criterios y técnicas estadísticas de análisis sobre la variable lluvia media anual (la cual se adopta a priori como representativa de los procesos que se estudian en este trabajo debido a su mayor disponibilidad espacial y temporal) de 15 localizaciones en la región de estudio. Se utilizaron series de datos pluviométricos mensuales de estaciones ubicadas en las provincias de Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos, para el periodo 1980-2009. Se lograron identificar tres grupos de estaciones con comportamiento similar en lo que se refiere a los procesos pluviométricos y, en particular, aquellos relacionados con las sequías intensas, lo que permite identificar escalas espaciales o subáreas de influencia de los fenómenos de déficit hidrometeorológico.

Palabras clave: región central Argentina, sequías meteorológicas, análisis multivariado, SPI.

Abstract

Vicario, L., García, C. M., Teich, I., Bertoni, J. C., Ravelo, A., & Rodríguez, A. (January-February, 2015). Characterization of Meteorological Droughts in the Central Argentina. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(1), 153-165.

Varying degrees of droughts repeatedly affect several regions in Argentina. Given the agricultural-livestock character of central Argentina, the analysis and assessment of droughts in that region is economically and strategically important. This situation is even more relevant since some of the largest cities in the country are located in this area. The present work analyzes the spatial variability of the meteorological droughts in the study area using the standardized precipitation index (SPI) for sub-areas and the region, while also taking into account the influence of ENSO. To identify the sub-areas affected by hydrometeorological deficits, annual mean rainfall was analyzed in 15 locations in the study area. Because of its widespread spatial and temporal availability, this variable was adopted a priori as representative of the processes studied by the present work. Criteria and statistical techniques were applied to this variable and monthly rain gauge series were used from stations in the provinces of Córdoba, Santa Fe and Entre Ríos for the period 1980-2009. Three groups of stations with similar pluviometric behavior were identified, particularly behaviors related to intense droughts, thereby identifying spatial scales or sub-areas of influence corresponding to the hydrometeorological deficit.

Keywords: Central region of Argentina, meteorological droughts, multivariate analysis, SPI.

Recibido: 08/03/13

Aceptado: 02/07/14

Introducción

La escasez de precipitaciones (valores observados menores a los esperados o medios) en un

área y en un periodo de tiempo determinado constituye un proceso hidrológico extremo denominado "sequía". Todos los lugares del planeta están sujetos a la eventual ocurrencia de

tales procesos, incluso las áreas típicamente lluviosas (Dracup, Lee, & Paulson, 1980). Estos fenómenos pueden ser detectados utilizando información de diversas variables. Al respecto, Wilhite y Glantz (1985) han definido cuatro categorías de sequías: a) meteorológicas: basadas en datos climáticos, es una expresión de la desviación de la precipitación respecto del valor promedio durante un periodo de tiempo determinado; b) agrícolas: cuando no hay suficiente humedad en el suelo para permitir el normal desarrollo de un determinado cultivo en cualquiera de sus fases de crecimiento; c) hidrológicas: es una deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (ríos, lagos, vertientes, etc.), y d) socioeconómicas: se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños (económicos o personales) a la población de una zona afectada por la escasez de lluvias.

Cuando se inicia un periodo de sequía, generalmente el sector agrícola es el primero en ser afectado debido a su alta dependencia de la cantidad de humedad en el suelo. No obstante, un periodo de sequía agrícola en una región es consecuencia de la ocurrencia previa de un periodo de sequía meteorológica y, a su vez, es posiblemente precedente a la ocurrencia de un periodo de sequía hidrológica, según la extensión en el tiempo, de una o más de sus características.

Las sequías se tratan de eventos inevitables, todavía poco predecibles (Kim, Valdés, & Aparicio, 2002) debido al comportamiento caótico de los procesos meteorológicos, por lo que para su caracterización se utilizan herramientas estadísticas. En particular, para caracterizar y describir estadísticamente las sequías, se tienen en cuenta sus principales variables, como la probabilidad de ocurrencia, duración e intensidad.

En ese ámbito, es necesario estudiar y analizar, para una mejor comprensión de los parámetros de la sequía, los umbrales específicos de estos procesos según la región hidroclimática (Mishra & Singh, 2010). El análisis de los periodos secos (con sequías) es requerido para realizar la planificación y el manejo de los recursos

hídricos en aquellas zonas donde gran parte de la actividad económica depende del aprovechamiento de esos recursos hídricos (Ortiz-Gómez, Barragán-Barrios, & Alvarado-Medellin, 2010). Dado el carácter agrícola-ganadero de la región central pampeana de la República Argentina y su relevancia en la economía territorial, es indispensable analizar las sequías en esa región, que provocan importantes pérdidas económicas en la agricultura y ganadería (Ravelo, 2009). 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, por consecuencia, de los cultivos, han comenzado a deteriorarse rápidamente por la sequía (Ravelo, Planchuelo, Zanvettor, Barbeito, & Marraco, 2008).

El estudio de las sequías en áreas de llanura (como 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, Cortez, Rodríguez, Rey, & Cabrera-Bisbal, 2007). Vicario (2008) recomienda que para favorecer el desarrollo de estudios certeros sobre el tema de la sequía y debido a la escasez de registros hidrometeorológicos e hidrológicos en la zona de estudio, es necesario implementar una red hidrometeorológica que permita conformar una base de datos completa. Mientras la situación de escasez de información esté presente, se destaca la importancia de efectuar un análisis regional, como el que se desarrolla en este trabajo, de la información de estaciones de superficie disponible, para identificar zonas hidrometeorológicamente homogéneas y optimizar la información existente para minimizar las incertidumbres en los resultados.

Para el análisis de los resultados del análisis regional de sequías se debe tener en cuenta que si bien los procesos de sequías son caóticos y se analizan estadísticamente, existen procesos climáticos de diferentes escalas temporales que podrían afectar sus probabilidades de ocurrencia e intensidad. En la zona de estudio, la escasez de precipitaciones puede estar relacionada con el fenómeno climatológico denominado ENSO (El Niño-Southern Oscillation), el cual

es el resultado de un ciclo de calentamiento y enfriamiento de la superficie del océano en el Pacífico Central y Oriental. Para determinados periodos, esta región presenta un enfriamiento inusual para su ubicación cercana al Ecuador debido a los vientos del noreste, a la subida de agua fría en la costa de Perú y por una corriente oceánica fría que llega desde la costa de Chile. Cuando dicho enfriamiento es más intenso de lo normal se conoce como el fenómeno de La Niña, lo que provoca efectos climáticos extremos en distintas macro-regiones del planeta, como periodos de sequía en América del Sur y lluvias intensas asociadas con inundaciones en Australia oriental. Por el contrario, cuando el enfriamiento disminuye de forma notoria, se conoce como el fenómeno de El Niño, provocando efectos inversos a los mencionados previamente. Por esta razón, es de interés analizar la relación de los periodos de sequía en la región central de Argentina con la ocurrencia de los ciclos del fenómeno ENSO (La Niña y El Niño), lo que permitiría realizar un pronóstico inicial de la posible ocurrencia de periodos de sequía.

El objetivo general del presente trabajo es estudiar la variabilidad espacial de las precipitaciones y de las sequías en la región central de la República Argentina. En la región de estudio, la principal componente de precipitación es la lluvia, por lo tanto ambos términos se utilizarán en forma indiferente. Para cumplir con el objetivo general se desarrollaron los siguientes objetivos específicos: (1) identificar zonas hidrometeorológicamente homogéneas mediante un análisis regional; (2) caracterizar las sequías meteorológicas de las zonas identificadas; (3) analizar la relación de los periodos de sequía observados con el fenómeno climático ENSO.

Materiales y métodos

Información utilizada

Se utilizaron datos de lluvias mensuales registradas en el periodo 1980-2009, pertene-

cientes a estaciones hidrometeorológicas de superficie de la región pampeana central de la Argentina. Los datos fueron registrados por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de la República Argentina, y están disponibles en el Sistema Integrado de Información Agropecuaria (SIIA, sitio web: <http://www.sii.gov.ar/>). Se incluyeron aquellas estaciones con datos para el periodo de estudio y con un porcentaje máximo de datos faltantes de 5%. Los datos faltantes para cada mes se completaron con los valores promedios históricos de ese mes para la estación analizada, a fin 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 el cuadro 1), de las cuales siete 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); cinco en la provincia de Santa Fe (en las localidades de Ceres, El Trébol, Rosario, Sauce Viejo y Venado Tuerto), y tres en la provincia de Entre Ríos (en las localidades de Gualaguaychú, Paraná y Concordia). Dado que el periodo de estudio incluye 30 años, se trabajó en cada estación con una serie de 360 valores de lluvia, correspondientes a los 12 meses de los 30 años incluidos en el periodo de estudio.

Análisis regional: identificación de zonas hidrometeorológicamente homogéneas

Para definir subgrupos de estaciones pluviométricas que caractericen zonas homogéneas respecto a sus características hidrometeorológicas que permitan realizar un análisis regional de las sequías, se implementaron dos metodologías que fueron utilizadas de 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 esta-

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

Estación	Provincia	Latitud (°S)	Longitud (°O)	Altitud (msnm)
Córdoba (CBA)	Córdoba	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	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
Guaaleguaychú (GUAL)	Entre Ríos	33.00	58.40	21
Paraná (PAR)		31.47	60.30	78
Concordia (CON)		31.18	58.00	38

dísticos multivariados). Para la primera opción 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 1 000 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 calculadas a partir de múltiples variables. Esos componentes son usados como ejes para la representación gráfica de los objetos. En la ordenación, cada unidad de estudio se ubica sobre uno o más ejes, tal que su posición relativa refleja las similitudes y/o distancias entre ellos (Gabriel, 1971). En el presente trabajo, el ACP se realizó sobre una matriz de 15×30 , correspondiente a las 15 estaciones pluviométricas (observaciones) y a los 30 valores de lluvias anuales en el periodo de estudio (variables). La ordenación de las estaciones pluviométricas resultante del ACP se analizó mediante un gráfico de dispersión.

Además, para identificar grupos de estaciones, se realizó un análisis de conglomerados utilizando como variables los 30 valores de lluvias anuales durante el periodo de estudio. 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 & 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).

Análisis de sequías meteorológicas

Una vez identificadas las subáreas pluviométricamente homogéneas, para evaluar el comportamiento de las sequías observando la variabilidad interanual del proceso, se calculó el índice de precipitación estandarizado (SPI) (McKee, Doesken, & Kliest, 1993) de cada serie temporal y luego se promedió en el nivel de subárea. Se utilizó este índice, ya que el SPI es el índice actual que sintetiza de forma más apropiada las características de la sequía 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 en relación con las condiciones medias de la escala o periodo que se considere (Velasco & Aparicio, 2004). Este índice considera las probabilidades de ocurrencia de precipitación pluvial para un periodo dado y 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). El índice SPI permite realizar la medición de la sequía en distintas escalas temporales, dependiendo del objetivo de estudio. En este caso, con el fin de observar y caracterizar el comportamiento plurianual de las sequías meteorológicas, a nivel mensual, a través de varias estaciones en una amplia región y en un periodo prolongado de tiempo (30 años), se considera pertinente utilizar la escala temporal de 12 meses para su estimación. Se considera sequía (situación de déficit) cuando el valor del índice es igual o menor a -1. McKee et al. (1993) definen los valores del SPI y las características de los periodos asociados con esos valores, los cuales se presentan en el cuadro 2.

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

Para analizar la relación de los periodos de sequía observados con el fenómeno climatológico ENSO, previa evaluación gráfica, se utiliza el método estadístico denominado Coeficiente de Correlación entre los Valores

Cuadro 2. Valores adimensionales del índice estandarizado de precipitación y las características de los periodos asociados (SPI).

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

Mensuales del SPI Regional Promedio (calculado a partir de los respectivos índices SPI de todas las estaciones de la región de estudio) y los valores del Índice Histórico de Temperatura Oceánica, representativo de las distintas fases del fenómeno ENSO, dentro del periodo de tiempo del presente estudio. El coeficiente de correlación entre dos variables aleatorias X e Y es el cociente entre la covarianza de (X, Y) y el producto de las desviaciones típicas de cada una de las variables. De esta manera se mide la fuerza de la relación lineal entre dos series de datos, donde mientras mayor sea el valor absoluto de la correlación, más fuerte es la relación lineal entre las dos variables y viceversa. Los valores límite del coeficiente son los siguientes: 1, que indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa; 0, no existe relación lineal; y -1 indica una dependencia total entre las dos variables, llamada relación inversa. A partir de estos umbrales se evalúan los valores intermedios de dicho coeficiente.

Resultados y discusión

Análisis regional: identificación de zonas hidrometeorológicamente 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 la condición de la diferencia en nivel topográfico, ni con la condición de diferencia en la pluviometría anual. Esto es coherente, ya que dicha estación está emplazada en la zona serrana. 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 estadístico multivariado de la variable de lluvia media anual, a fin 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, siendo el primer eje (CP1) el más importante para visualizar variabilidad entre observaciones, ya que explica un 67% de la variabilidad total. Este eje está asociado con mayores valores de precipitaciones medias anuales, en particular de los años 2002 y 2009. Es decir, altos valores de CP1 indican mayores precipitaciones anuales durante el periodo de estudio, en particular en los años 2002 y 2009. En la figura 1 se observa que 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. En la figura 1 se observa además que las estaciones de Villa Dolores y Concordia están alejadas del resto de los casos del conjunto en relación con 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.

Dado el número de estaciones y según las características físicas y pluviométricas de las mismas, se definió que la cantidad óptima de zonas o subáreas 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 Gualeguaychú; 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

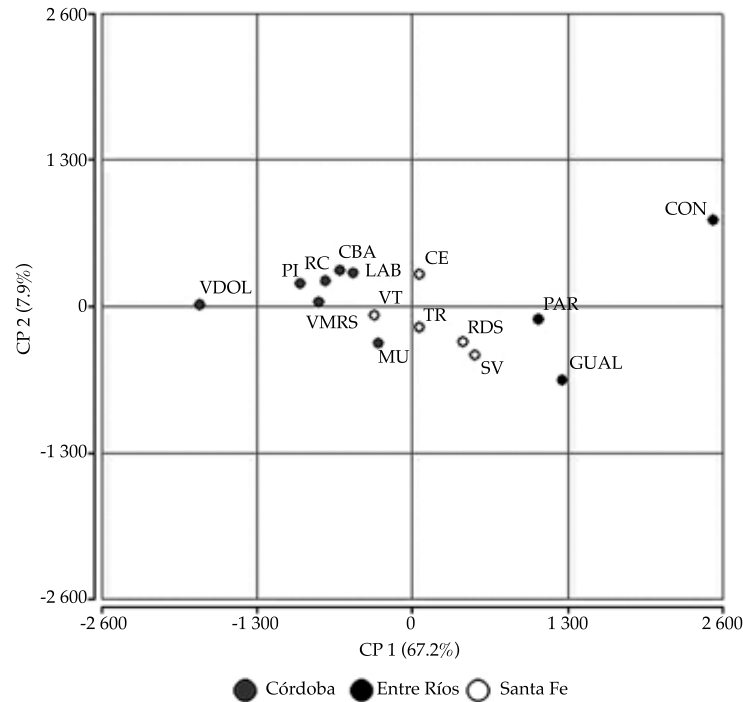


Figura 1. Ordenamiento de las estaciones pluviométricas de la región central de Argentina en el plano definido por las dos primeras componentes principales obtenidas del ACP realizado sobre los datos de lluvia anual entre 1980 y 2009. Los diferentes tonos de gris corresponden a estaciones ubicadas en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

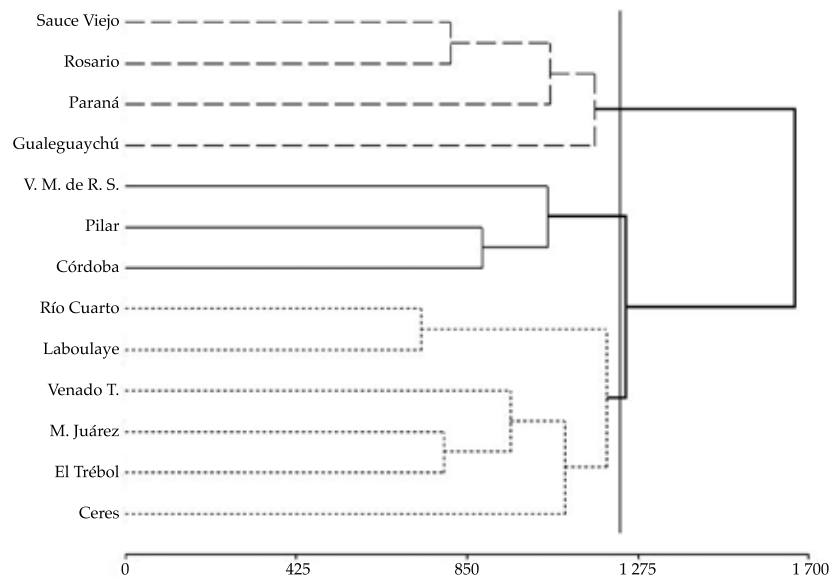


Figura 2. Dendrograma obtenido mediante el análisis de conglomerados (distancia euclídea y encadenamiento promedio) realizado sobre los datos de lluvia anual entre los años 1980 y 2009 de las 13 estaciones analizadas. La línea gris vertical indica la distancia a la cual se separan los tres grupos obtenidos. La línea discontinua (---) indica aquellas estaciones pluviométricas que conforman el grupo 1; el grupo 2 se señala mediante una línea sólida (—), y el grupo 3 mediante una línea punteada (...).

mediante el análisis de conglomerados, y en la figura 3 se ubica la región de estudio dentro de un mapa de la República Argentina y se identifican las estaciones que conforman cada una de las agrupaciones o subáreas.

Análisis de sequías meteorológicas

Una vez agrupadas las estaciones representativas en cada subárea, se analizaron las sequías meteorológicas 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 periodos secos.

En el caso del grupo 1 (Sauce Viejo, Rosario, Paraná y Gualeguaychú), todas presentaron periodos de sequía 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 periodos de sequía 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, con excepción de la estación de Córdoba, que presentó sequías moderadas a severas. En cuanto 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, periodos con sequías severas y/o extremas alrededor de los años 1989 y 2008-2009 en todas las estaciones; desde 1996 hasta 2006 se registraron distintos eventos de sequías intensas en algunas de las estaciones que conforman el grupo. En la figura 4 se muestran los valores promedio del índice SPI de cada grupo de estaciones. 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

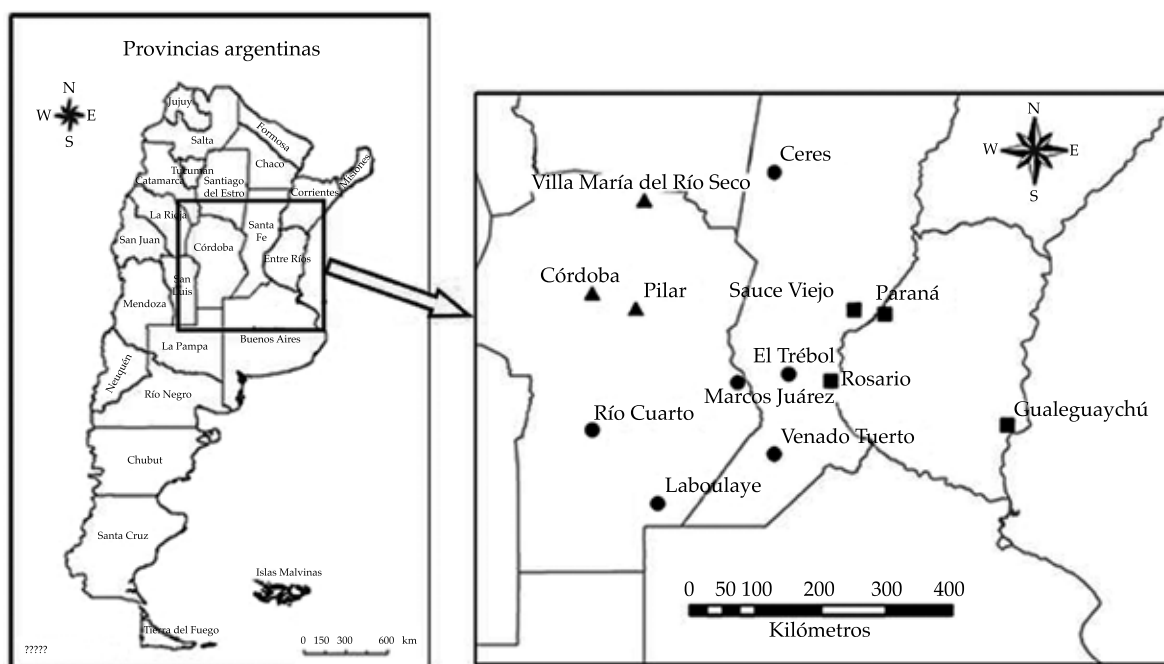


Figura 3. Ubicación de las provincias de la República Argentina que integran el área de estudio de oeste a este: Córdoba, Santa Fe y Entre Ríos; en su ampliación se indica la localización de las estaciones que conforman cada una de las agrupaciones: grupo 1: cuadrado; grupo 2: triángulo; grupo 3: círculo.

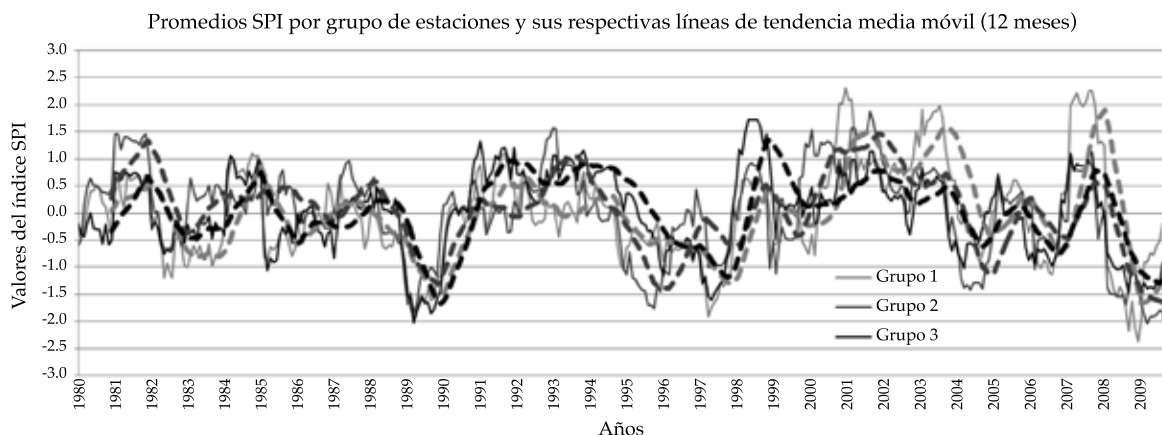


Figura 4. Gráfico de los valores promedio del índice SPI de cada uno de los grupos de estaciones y sus respectivas líneas de tendencia obtenidas a partir de la media móvil de 12 meses (líneas de puntos). Grupo 1: gris claro; grupo 2: gris, y grupo 3: negro.

hidrometeorológico (sequía) en la región en la segunda mitad de cada década.

Por otro lado, se observó, a través del análisis del Índice SPI promedio de cada grupo de estaciones, que en el ámbito regional y a partir del año 1998, aproximadamente, los ciclos húmedos son más importantes en cuanto a su intensidad. Para identificar con más claridad esta situación, se graficaron las líneas de tendencia obtenidas a partir de la media móvil de 12 meses de las series de datos de valores promedio del índice SPI de cada grupo de estaciones, también mostradas en la figura 4. Se observa que hasta el año 1997, aproximadamente, los grupo 1 y 3 se comportaban de manera similar. No obstante, a partir del año 1998 hasta el final de la serie, las tendencias de los tres 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. A partir de este análisis de tendencias, se realiza el análisis estadístico descriptivo de los valores SPI promedios de cada grupo, en primera instancia de la serie completa y luego de la serie dividida en dos muestras: 1980-1997 y 1998-2009. Los resultados se presentan, respectivamente, en los cuadros 3 y 4.

Es posible observar que, en efecto, en el primer periodo analizado (1980-1997), el grupo 2 posee sus valores característicos por encima del resto de los valores de los grupos 1 y 3. Sin embargo, a partir del año 1998, el grupo 1 posee un valor de la media mayor y positiva respecto del primer periodo y del resto de los grupos, lo que indicaría ciclos húmedos más intensos o bien mayor cantidad de meses con registros de lluvia en las estaciones que lo conforman.

Cuadro 3. Estadística descriptiva de las series de valores promedio del índice estandarizado de precipitación SPI de cada grupo de estaciones (1980-2009)

Variable	<i>n</i>	Media	DE	Var (<i>n</i>)
Grupo 1	360	-0.02	0.90	0.80
Grupo 2	360	0.01	0.87	0.75
Grupo 3	360	-0.0004	0.77	0.59

Cuadro 4. Estadística descriptiva de las series de valores promedio del índice estandarizado de precipitación SPI de cada grupo de estaciones en los periodos 1980-1997 y 1998-2009.

Periodos	Variable	<i>n</i>	Media	DE	Var (<i>n</i>)
1980-1997	Grupo 1	204	-0.17	0.64	0.41
	Grupo 2	204	0.05	0.73	0.54
	Grupo 3	204	0.02	0.72	0.51
1998-2009	Grupo 1	156	0.17	1.12	1.24
	Grupo 2	156	-0.04	1.02	1.02
	Grupo 3	156	-0.03	0.83	0.68

Análisis de la relación entre sequías meteorológicas observadas y el fenómeno ENSO

La figura 5 muestra el Índice Histórico de Temperatura Oceánica (NOAA, 2012) para el periodo 1982-2012, el cual indica la ocurrencia de eventos El Niño (valores del índice mayor que cero) o La Niña (valores del índice menores a cero), si las diferencias de temperaturas (con respecto a su valor normal) son superiores o inferiores a cero, respectivamente. Del contraste de esta figura con la figura 4 es posible observar que dentro del periodo de estudio coinciden los años donde se suceden sequías intensas en los tres grupos de estaciones representativas del área de estudio, con la ocurrencia del fenómeno La Niña. Sin embargo, dentro del periodo que abarca el presente trabajo, ocurrieron otros periodos de La Niña, tales como en los años 1984-1986 y 1999-2001, entre otros eventos menores, que no tuvieron efectos notables en cuanto a la intensidad de las sequías. A partir de esto se aplica el Coeficiente de Correlación entre las Series Completas de los Valores Mensuales del SPI Regional Promedio y los valores del Índice Histórico de Temperatura Oceánica. En este caso se observa una falta de correlación total entre los índice analizados, ya que el valor del coeficiente es aproximado a cero. Mientras que, si sólo se correlacionan los periodos definidos por el Índice Histórico de Temperatura Oceánica, como La Niña, con los respectivos valores del SPI en el mismo periodo, el coeficiente asciende a 0.14. A pesar de esto, no se considera un valor aceptable para

definir algún tipo de relación directa entre la ocurrencia de los periodos La Niña del ENSO con la ocurrencia de sequías meteorológicas en la región. Esto denota que si bien en la región central de Argentina el fenómeno de La Niña es una causa fundamental de la escasez de lluvias, la identificación de los factores y la interacción de los mismos para la determinación de las características de los periodos de sequía es complejo. Al respecto, Cicero (2005) destaca que en la República Argentina, el fenómeno denominado ENSO afecta de manera diferenciada y sus efectos varían según la región. Tal es así, que en algunas zonas del centro del país y del litoral, los periodos de El Niño pueden provocar una disminución de las precipitaciones y, en otros casos, los ciclos de La Niña pueden generar lluvias por encima de lo normal. Por otra parte, Coronel y Sacchi (2006) observaron que en una localidad del sur santafesino, los eventos secos y húmedos pueden ocurrir tanto en situaciones de El Niño, La Niña o neutralidad, e infieren la necesidad de analizar en el ámbito local las relaciones existentes entre la precipitación y las anomalías atmosféricas de gran escala.

Conclusiones

En este trabajo se analiza la variabilidad espacial de las sequías 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 cuanto a los procesos pluviométricos y, en particular, a

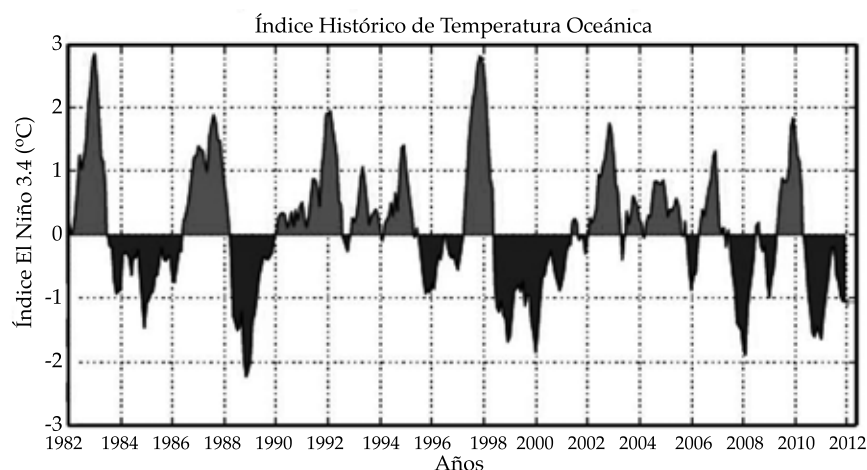


Figura 5. Índice Histórico de Temperatura Oceánica (1982-2009). Valores del índice menores y mayores a cero indican condiciones asociadas con la ocurrencia de La Niña y El Niño, respectivamente. Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Earth System Research Laboratory (ESRL, 2012).

aquellos relacionados con las sequías intensas, lo que permite identificar escalas espaciales o subáreas de influencia de los fenómenos de déficit hidrometeorológico.

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 subáreas homogéneas estadísticamente (grupos). Considerando su comportamiento pluviométrico y las estaciones representativas de cada una son las siguientes: grupo 1: estaciones de Sauce Viejo, Rosario, Paraná y Gualeguaychú; grupo 2: estaciones de Villa María de Río Seco, Pilar y Córdoba; grupo 3: estaciones de Río Cuarto, Laboulaye, Venado Tuerto, Marco Juárez, el Trébol y Ceres.

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 en cuanto a los periodos de sequía.

Específicamente, en los tres grupos se observaron periodos de sequía severas y/o extremas alrededor de los años 1989 y 2008-2009 en todas las estaciones, además de eventos puntuales de sequías intensas en algunas de ellas a fines de la década de 1990. Esto indicaría un posible déficit hidrometeorológico regional en la segunda mitad de cada década. Además, se observó que hacia el este del área de estudio y a partir de fines de la década de 1990, los periodos húmedos son más intensos.

A través del análisis de la evolución del Índice Histórico de Temperatura Oceánica, durante estos años con déficit ocurrieron periodos del fenómeno La Niña. Sin embargo, dentro del periodo de estudio sucedieron otros ciclos de La Niña que no tuvieron efectos notables en cuanto a las sequías en la región. Aplicando el Coeficiente de Correlación, se observa que no existe relación entre los valores mensuales del SPI promedio de la región de estudio y los valores del Índice Histórico de Temperatura Oceánica. Mientras que, si sólo se correlacionan los periodos La Niña con los respectivos valores del SPI, el coeficiente se incrementa levemente, pero no se considera un valor aceptable para

definir algún tipo de relación directa entre la ocurrencia de los periodos la Niña del ENSO con la ocurrencia de sequías meteorológicas en la región. Esto muestra que si bien en la región central de Argentina el fenómeno de La Niña podría ser una causa de la escasez de lluvias, la determinación de las características de los periodos de sequía es más compleja.

Referencias

- Cicero, A. R. (2005). *Evaluación agrometeorológica de indicadores de sequía en la provincia de Mendoza*. Tesis de Magíster en Ciencias Agropecuarias. Mención Agrometeorología. Córdoba, Argentina: Escuela para Graduados, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba.
- Coronel, A., & Sacchi, O. (2006). Climatología de eventos secos y húmedos en el sur santafesino. *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Rosario*, 9, 15-24.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2011). *InfoStat versión 2011*. Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. Recuperado de <http://www.infostat.com.ar>
- Dracup, J. A., Lee, K. S., & Paulson, E. G. Jr. (1980). On the Definitions of Drought. *WRR*, 16(2), 297-302.
- ESRL-NOAA (2012). Earth System Research Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Recuperado de <http://www.esrl.noaa.gov/>.
- Gabriel, K. R. (1971). Biplot Display of Multivariate Matrices with Application to Principal Components Analysis. *Biometrika*, 58, 453-467.
- Kim, T., Valdés, J. B., & Aparicio, J. (September, 2002). Frequency and Spatial Characteristics of Droughts in the Conchos River Basin, México. *Water International*, 27(3), 420-430.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kliest, J. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales (pp. 179-184). In *Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology*, 17-22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston.
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A Review of Drought Concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216.
- Ortiz-Gómez, R., Barragán-Barrios, M. C., & Alvarado-Medellín, P. (noviembre, 2010). *Evaluación de la sequía meteorológica a escala regional en la cuenca Lerma Chapala*. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Punta del Este, Uruguay.
- Ovalles, F., Cortez, A., Rodríguez, M., Rey, J., & 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. Chapter 2. In *Australian Rainfall and Runoff*. Canberra, Australy: The Institution of Engineers.
- Ravelo, A. C. (2009). *Monitoreo y evaluación de las sequías en Argentina*. Seminario Internacional sobre Sequías y Gestión del Riesgo Climático. Chile: CAZALAC.
- 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*. Periodo septiembre, 5 pp.
- 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* (53 pp.). WMO Technical Note Number 81. Geneva, Switzerland: Secretariat of the World Meteorological Organization.
- Velasco, I., & Aparicio, J. (julio-septiembre, 2004). Evaluación de índices de sequía en las cuencas de afluentes del río Bravo/Grande. *Ingeniería Hidráulica en México*, 19(3), 37-53.
- Vicario, L. (2008). *Evaluación de las sequías hidro-meteorológicas en la cuenca del dique San Roque, Córdoba*. Tesis de maestría. Córdoba, Argentina: FCEfyN, Universidad Nacional de Córdoba.
- Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water International*, 10, 111-120.
- Young, K. C. (1992). A Three-Way Model for Interpolating for Monthly Precipitation Values. *Monthly Weather Review*, 120, 2561-2569.

Dirección institucional de los autores

M.I. Leticia Vicario

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Centro de Estudios y Tecnología del Agua
Universidad Nacional de Córdoba
Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria
Cba., Rep. Argentina
Teléfono y fax: +54 (0351) 4334 446
lvicariotm@gmail.com

Dr. Carlos M. García

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet)
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Universidad Nacional de Córdoba
Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria
Cba., República Argentina
Teléfono y fax: +54 (0351) 4334 446
cgarcia2mjc@gmail.com

Dra. Ingrid Teich

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
(Conicet)
Estadística y Biometría
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Universidad Nacional de Córdoba
Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria
Cba., República Argentina
Teléfono y fax: +54 (0351) 4334 103
ingridteich@gmail.com

Dr. Juan Carlos Bertoni

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Universidad Nacional de Córdoba
Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria
Cba., República Argentina
Teléfono y fax: +54 (0351) 5353 800
jcbertoni@gmail.com

Dr. Andrés Ravelo

Facultad de Ciencias Agropecuarias
Universidad Nacional de Córdoba
Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria
Cba., República Argentina
Teléfono y fax: +54 (0351) 4334 103
ravelo1@crean.agro.uncor.edu

Dr. Andrés Rodríguez

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
(Conicet)
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Universidad Nacional de Córdoba
Av. Filloy s/n, Ciudad Universitaria
Cba., República Argentina
Teléfono y fax: +54 (0351) 4334 446
arodrig@efn.uncor.edu