

**EL ÍNDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN
COMO HERRAMIENTA PARA LA CARACTERIZACIÓN Y EL
MONITOREO DE LA SEQUÍA: UNA PRUEBA DE CONCEPTO.**

Silvia E. Núñez^(a), Liliana N. Núñez^(a), Guillermo P. Podestá^(b), María de los Milagros Skansi^(a)

^(a)Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.
snunez@meteofa.mil.ar

^(b)University of Miami, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science
gpodesta@rsmas.miami.edu

RESUMEN

El Índice Estandarizado de Precipitación (Standardized Precipitation Index, SPI) se utiliza cada vez más debido a su simplicidad y flexibilidad para el estudio de la precipitación en varias escalas temporales. El Servicio Meteorológico Nacional está probando esta herramienta para caracterizar la climatología de la sequía en la Argentina. Aquí se presentan resultados calculados con datos de precipitación correspondientes a la estación meteorológica Buenos Aires (1861-2004). El SPI muestra una tendencia positiva desde la segunda mitad del siglo XIX hasta la actualidad. El índice permite reconocer (a) la ausencia de sequías severas y extremas de más de 12 meses de duración durante 1961-2004, (b) una mayor frecuencia de sequías moderadas en 1861-1910 y (c) una mayor frecuencia de excesos extremos y severos de 24 meses de duración en los últimos 44 años. Los resultados sugieren que el SPI es adecuado para la identificación y seguimiento de eventos secos y húmedos en la región húmeda argentina.

The Standardized Precipitation Index (SPI) is increasingly being used because of its simplicity and flexibility for the study of precipitation at various temporal scales. The Argentine Meteorological Service is testing this tool for the characterization of drought in Argentina. This work presents results derived from precipitation data (1861-2004) for Buenos Aires. The SPI shows a positive trend from the second half of the 19th century to the present. The index also indicates (a) the absence of severe and extreme droughts lasting more than 12 months during 1961-2004, (b) a higher frequency of moderate droughts during 1861-1910, and (c) a higher frequency of severe and extreme precipitation excesses lasting 24 months in the last 44 years. Preliminary results suggest that the SPI is a useful tool for identifying and monitoring wet and dry events in the humid region of Argentina.

INTRODUCCIÓN

La sequía es un fenómeno recurrente en el clima de Argentina; ella puede ocurrir tanto en latitudes bajas como en altas y en cualquier época del año. Su aparición, más silenciosa y lenta que la de las inundaciones, produce, no obstante, severos impactos socioeconómicos (Wilhite, 2000), particularmente en la zona húmeda de nuestro país donde el carácter benigno del clima propicia que las actividades humanas sean altamente dependientes del mismo. Es posible definir la sequía en término de las condiciones meteorológicas, hidrológicas, agronómicas y/o socioeconómicas imperantes, razón por la cual existe en la literatura un gran número de índices y/o parámetros asociados a ella (WMO, 1975 y Heim, 2002).

No cabe duda que la precipitación y la evapotranspiración son los principales factores que controlan la aparición y persistencia de las condiciones de sequía. Sin embargo, las dificultades históricas para cuantificar realísticamente la evapotranspiración han alentado a los investigadores de todo el mundo a desarrollar indicadores simples, en lo posible que sólo dependan de la precipitación. Haciéndose eco de esta inquietud, McKee y otros desarrollaron, en 1993, el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) el cual consiste en el ajuste de la serie de precipitación con una distribución teórica apropiada (generalmente la Gamma de dos parámetros) y su posterior transformación en una distribución normal estandarizada. Su virtud más relevante es que puede ser calculado, en forma simple, para una gran variedad de escalas temporales, lo cual lo hace apto para el estudio de sequía cortas (importantes para la agricultura) o muy prolongadas (relevantes para evaluar la disponibilidad de agua subterránea, la escorrentía y los niveles de lagos o reservorios de agua). Más allá de su amplia aceptación mundial, en nuestro país diversos investigadores lo han incluido satisfactoriamente en sus estudios. (Seiler y otros, 2002; Almeida y otros, 2005; Scian, 1997).

Haciéndose eco de la relevancia de los impactos socio-económicos de la sequía, muy marcados en la región húmeda argentina donde las actividades humanas son altamente dependientes del clima, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) proyecta llevar a cabo el estudio exhaustivo de la climatología de la sequía en todo el país, e incorporar, en forma operativa, un servicio de monitoreo de este fenómeno, usando como indicador el índice SPI para 1, 3, 6, 12, 18 y 24 meses.

En este trabajo se presenta la primera prueba de concepto de esta herramienta aplicada a los datos de la estación meteorológica Buenos Aires, elegida en virtud de la longitud y exhaustivo control de sus registros.

METODOLOGÍA

El índice estandarizado de precipitación (SPI)

Un déficit de precipitación impacta en la humedad de suelo, la escorrentía, los reservorios de agua, el nivel de la napa freática, etc. en diferentes escalas de tiempo. Una forma de evaluar la ocurrencia de déficit o excesos significativos por su intensidad y/o duración es mediante el uso del SPI (McKee y otros, 1993), dado que el mismo es apropiado para cuantificarlos en múltiples escalas temporales. Así, la escorrentía en los flujos de agua ha sido bien descripta por medio del SPI a escalas de 2 a 6 meses; del mismo modo, se han encontrado fuertes relaciones entre el SPI a escalas de 6 a 24 meses y la variación del nivel de la napa freática, mientras que la sequía agronómica ha podido ser bien representada por el SPI a escalas de 2 y 3 meses.

Técnicamente, el SPI es calculado ajustando la distribución de frecuencia de la precipitación de un lugar dado, en la escala de tiempo de interés, con una función teórica de densidad de probabilidad. De acuerdo a varios autores (Thom, 1966; Young, 1992, Lloyd-Hughes, 2002, entre otros), la función más apropiada para este ajuste es la Gamma, si bien ésta ofrece algunas dificultades en las zonas de muy poca precipitación, debido a que no se encuentra definida para valores de la variable iguales a 0. La función de densidad es luego transformada a una distribución normal estandarizada (con media igual a 0 y varianza igual a 1), siendo el SPI el valor resultante de esta transformación. Este índice representa el número de desviaciones estándar en que el valor transformado de la precipitación se desvía del promedio histórico (el cual queda representado por 0). Los valores negativos del SPI representan déficit de precipitación y, contrariamente, los valores positivos indican que la precipitación ocurrida ha sido superior al promedio histórico. En la Tabla 1 se muestra la clasificación del SPI propuesta por Lloyd-Hughes y otros, 2002.

Tabla 1. Clasificación del SPI por categorías y su probabilidad de ocurrencia		
VALOR SPI	CATEGORIA	PROBABILIDAD (%)
2.00 o mayor	Extremadamente húmedo	2.3
1.50 a 1.99	Muy húmedo	4.4
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo	9.2
0 a 0.99	Ligeramente húmedo	34.1
0 a -0.99	Ligeramente seco	34.1
-1.00 a -1.49	Moderadamente seco (sequía moderadas)	9.2
-1.50 a -1.99	Muy seco (sequía severa)	4.4
-2.00 o menor	Extremadamente seco (sequía extrema)	2.3

Es recomendable que el cálculo del SPI para un período de tiempo dado, en un lugar determinado, se haga en base a los registros de precipitación de, como mínimo, 30 años.

Ventajas y desventajas del SPI

Hayes *et al.* (1999) analizaron las ventajas y desventajas de la utilización del SPI para caracterizar la severidad de las sequías. El SPI tiene tres ventajas principales:

- La primera ventaja es su simplicidad. El SPI esta basado solamente en la precipitación y requiere sólo la estimación de los dos parámetros de la Gamma, comparado con los 68 términos necesarios para describir, por ejemplo, el PDSI (Palmer Drought Severity Index), otro índice ampliamente utilizado. Al eliminar la dependencia con las condiciones de humedad del suelo, el SPI puede ser utilizado efectivamente en las distintas estaciones del año. El SPI tampoco es afectado por la topografía.
- La segunda ventaja del SPI es que puede ser calculado para escalas de tiempo variables, lo cual lo hace aplicable en el ámbito de la meteorología, agricultura e hidrología superficial y subterránea. Esta versatilidad temporal es también útil para el análisis de la dinámica de la sequía, especialmente la determinación del comienzo y el fin, lo que ha sido difícil de reconocer por medio de otros índices.
- La tercera ventaja proviene de la estandarización, lo que asegura que la frecuencia de los eventos extremos en cualquier localidad y en cualquier escala de tiempo es consistente. No obstante, el SPI tiene tres potenciales desventajas.

- La primera desventaja depende de la calidad de los datos de precipitación utilizados. Datos erróneos conducen a SPI erróneos.
- Una segunda limitación del SPI surge de la naturaleza estandarizada del mismo índice, es decir que las sequías extremas (o cualquier otro tipo de sequías) tienen la misma probabilidad de ocurrencia en cualquier lugar. Luego, el SPI no es capaz de identificar regiones que son más propensas que otras a la ocurrencia de sequías.
- Un tercer problema puede surgir cuando el SPI es empleado en las escalas de tiempo más cortas (1, 2 ó 3 meses), en regiones de baja precipitación estacional. En estos casos, pueden ocurrir valores positivos (o negativos) altos que son susceptibles de ser erróneamente interpretados. En estas situaciones, un acabado conocimiento de la climatología de estas regiones mejora la interpretación del SPI.

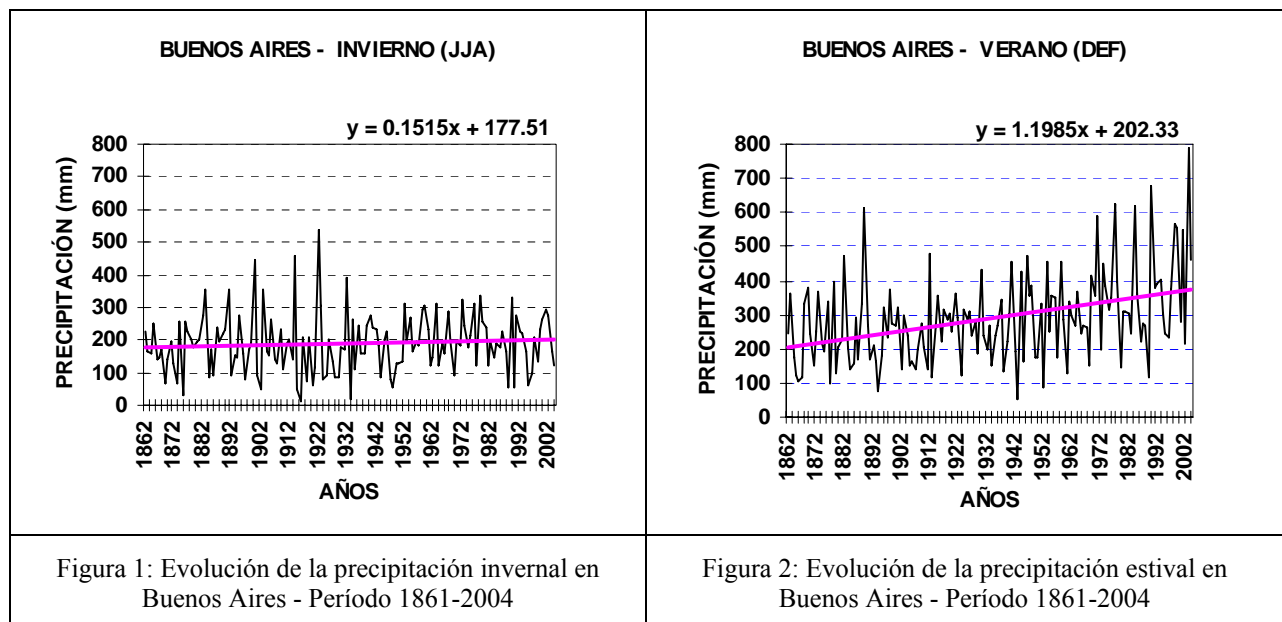
DATOS

En este trabajo sólo se presenta la prueba de concepto de esta herramienta aplicada a los datos de la estación meteorológica Buenos Aires, elegida en virtud de la longitud y exhaustivo control de sus registros. El período considerado fue 1861-2004.

RESULTADOS

Se analizó, en forma mensual, la evolución de la precipitación registrada en la estación meteorológica Buenos Aires desde 1861 hasta el 2004, con la finalidad de detectar la tendencia observada, dado que ésta puede tener una importante incidencia en la categorización de la severidad de los períodos secos y húmedos, al usar el SPI. Solo junio y septiembre mostraron una muy leve tendencia negativa; para los otros meses la tendencia es positiva, y mucho más marcada en enero y febrero.

Si el análisis se realiza por trimestres, en todos ellos la tendencia es positiva, como ejemplo se muestre el trimestre correspondiente al INVIERNO (junio-julio-agosto) y al VERANO (diciembre-enero-febrero) (Figuras 1 y 2).



Se calcularon valores del SPI mediante el modelado de los datos de precipitación con la distribución Gamma de dos parámetros. Los parámetros ALFA y BETA de esta distribución fueron estimados según los métodos “robusto” y de “máxima verosimilitud”. La bondad de ambos ajustes fue verificada por medio del test de Kolmogorov-Smirnov al nivel de confianza del 5 %, siendo ambos aceptados.

El cálculo se realizó para seis escalas temporales (1, 3, 6, 12, 18 y 24 meses). Los SPI obtenidos y su tendencia polinomial se muestran en la figura 3. Para todas las escalas puede apreciarse una tendencia creciente, si bien ésta es casi imperceptible en la escala de 1 mes y se acentúa a medida que aumenta la escala temporal. Asimismo, puede notarse que dicha tendencia se incrementa hacia el final del período.

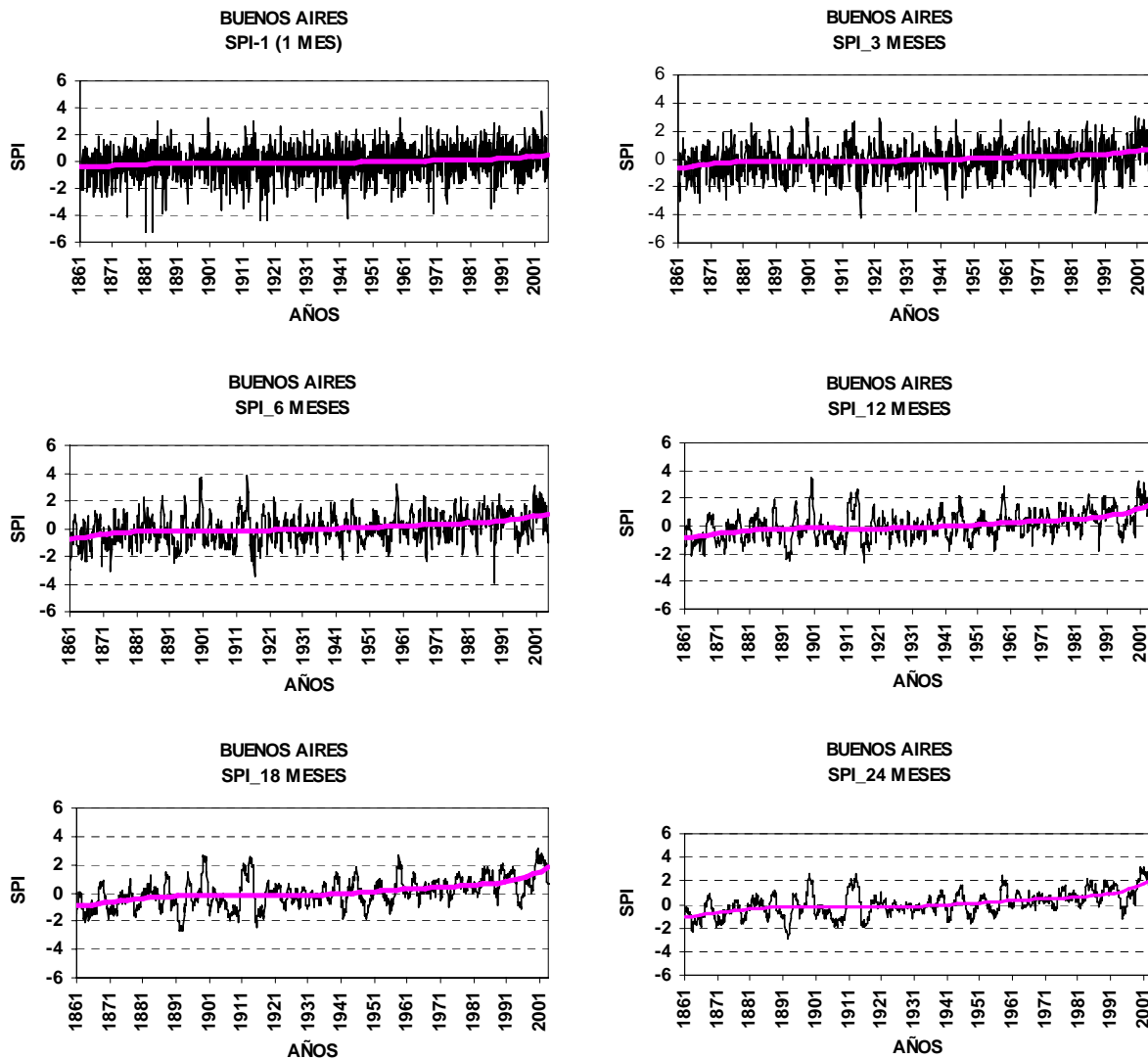


Figura 3: Evolución del SPI para 1, 3, 6, 12, 18 y 24 meses.

Con el propósito de analizar más detalladamente esta tendencia, se subdividió el período 1861-2004 en tres sub-períodos: 1861-1910 (50 años), 1911-1960 (50 años) y 1961-2004 (44 años). Para cada uno de ellos se calculó la frecuencia media de ocurrencia de sequías y excesos, según las categorías ya citadas propuestas por Lloyd-Hughes y otros, 2002.

En la Tabla 2 puede apreciarse que, en Buenos Aires, no es frecuente observar sequías extremas ($SPI \leq -2.00$) de larga duración (12, 18 y 24 meses). Al comparar los períodos 1861-1910 y 1911-1961, puede notarse una cuasi constancia en la frecuencia de sequías extremas en las escalas de 1, 3 y 6 meses; contrariamente, se observa una marcada disminución para las escalas superiores. A su vez, en el período 1961-2004 se ha producido una disminución de la frecuencia de ocurrencia de las sequías extremas en todas las escalas temporales. Particularmente, en este último período no se registraron sequías extremas de más de 6 meses.

PERIODO	SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 12	SPI 18	SPI 24
1861-2004	4	3	1	2	1	1
1861-1910	5	3	2	4	3	3
1911-1960	5	3	2	1	1	0
1961-2004	2	2	0	0	0	0

Tabla 2. Frecuencia porcentual de sequías extremas

En cuanto a las sequías severas ($-1.99 \leq SPI \leq -1.50$; Tabla 3), se aprecia una sensible disminución de su frecuencia de ocurrencia en el período 1911-1960, excepto en la escala temporal de 1 mes donde se mantiene constante. A su vez, en el período 1961-2004 se observa una disminución de la frecuencia en todas las escalas, no registrándose sequías severas de 12, 18 y 24 meses.

PERIODO	SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 12	SPI 18	SPI 24
1861-2004	4	5	5	3	4	5
1861-1910	5	8	9	5	8	9
1911-1960	5	4	4	4	4	4
1961-2004	3	3	2	0	0	0

Tabla 3. Frecuencia porcentual de sequías severas

Con referencia a las sequías moderadas ($-1.49 \leq SPI \leq -1.00$; Tabla 4), el período 1861-1910 presenta altas frecuencias en todas las escalas, siendo máximas en las escalas temporales de 12, 18 y 24 meses. A su vez, en el período 1911-1961 se nota una sensible disminución de la frecuencia de sequías moderadas en todas las escalas, aunque todas son equiprobables. Esta disminución se acentúa en el período 1961-2004, excepto en la escala de 1 mes. Las sequías de 12, 18 y 24 meses son las de menor frecuencia.

PERIODO	SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 12	SPI 18	SPI 24
1861-2004	8	9	9	10	10	10
1861-1910	11	13	13	20	20	21
1911-1960	7	9	9	9	8	9
1961-2004	6	5	4	1	1	1

Tabla 4. Frecuencia porcentual de sequías moderadas

Con respecto a los excesos extremos de precipitación ($SPI > 1.99$; Tabla 5), los dos primeros períodos de 50 años han presentado una cuasi-constancia en la frecuencia de estos eventos en todas las escalas, excepto la de 1 mes y 12 meses en las que se observa un importante aumento en 1911-1961. Los excesos extremos más frecuentes son los de 24 meses. En el período 1961-2004 se duplica la frecuencia en las escalas de 3, 18 y 24 meses, siendo esta última la de máxima frecuencia.

PERIODO	SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 12	SPI 18	SPI 24
1861-2004	2	3	3	4	4	4
1861-1910	1	2	3	1	2	2
1911-1960	3	2	3	4	3	2
1961-2004	3	4	5	7	6	8

Tabla 5. Frecuencia porcentual de excesos extremos

En cuanto a los excesos severos ($1.50 \leq SPI \leq 1.99$; Tabla 6), en 1911-1960 se nota un aumento de la frecuencia de ocurrencia en todas las escalas temporales, particularmente en la de 18 y 24 meses, siendo estos últimos los más frecuentes. En el período 1961-2004 ha habido un aumento de la frecuencia en todas las escalas. El máximo aumento se produjo en las escalas de 18 y 24 meses las que, además, presentan la máxima frecuencia de ocurrencia.

PERIODO	SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 12	SPI 18	SPI 24
1861-2004	5	4	5	4	5	6
1861-1910	3	2	2	2	0	2
1911-1960	5	4	5	4	5	7
1961-2004	6	6	9	7	9	11

Tabla 6. Frecuencia porcentual de excesos severos

Finalmente, ha habido un aumento muy marcado a los largo del tiempo en los excesos moderados ($1.00 \leq SPI \leq 1.49$; Tabla 7). Las mayores variaciones se produjeron en las escalas de 12, 18 y 24 meses.

PERIODO	SPI 1	SPI 3	SPI 6	SPI 12	SPI 18	SPI 24
1861-2004	9	9	9	9	9	8
1861-1910	7	3	4	3	4	1
1911-1960	9	10	7	7	6	7
1961-2004	10	14	17	19	17	16

Tabla 7. Frecuencia porcentual de excesos moderados

Esta tendencia a la disminución de los episodios secos y al aumento de los episodios húmedos en Buenos Aires (Figura 4) (hecho observado en toda la región húmeda argentina en las últimas décadas) sugiere la conveniencia de considerar, como período de referencia para el cálculo operativo del SPI, los últimos años del registro para evitar un sesgo en los valores del índice.

A manera de ejemplo, se muestra la comparación de los valores del SPI-3 calculados, para Buenos Aires, en base a todo el registro 1861-2004 y a los últimos 40 años del siglo XX, para el verano y el invierno (Figura 5 y 6). Puede apreciarse el mencionado sesgo, más marcado

en el verano y casi imperceptible en el invierno, debido a que la tendencia invernal de la lluvia es casi neutra.

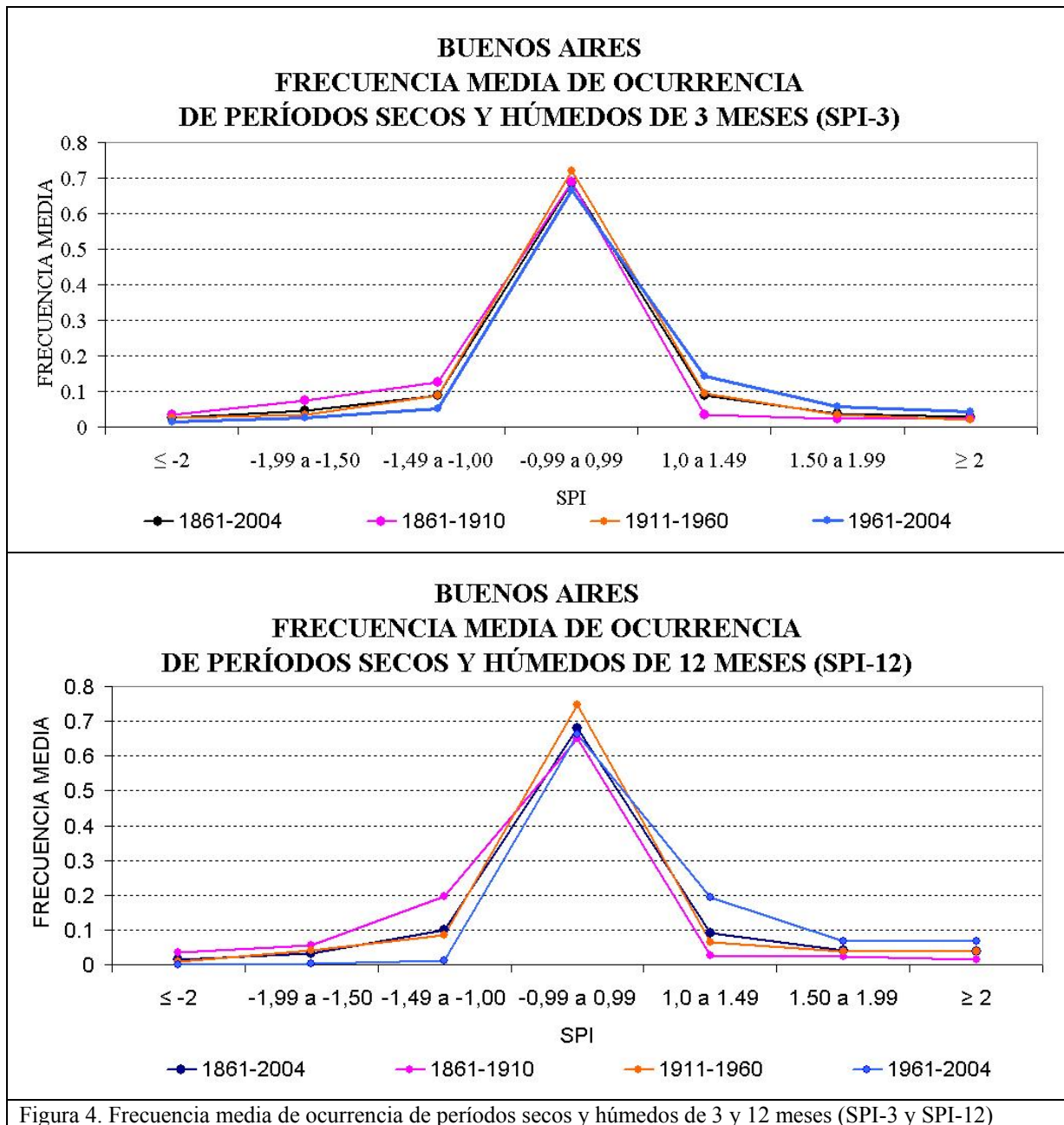


Figura 4. Frecuencia media de ocurrencia de periodos secos y húmedos de 3 y 12 meses (SPI-3 y SPI-12)

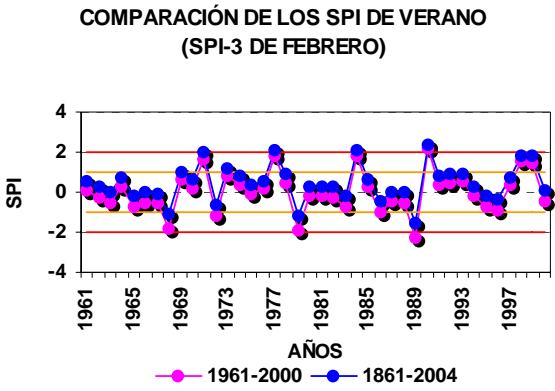


Fig. 5. Comparación de los SPI-3 de febrero (verano), calculados para los periodos 1861-2004 y 1961-2000

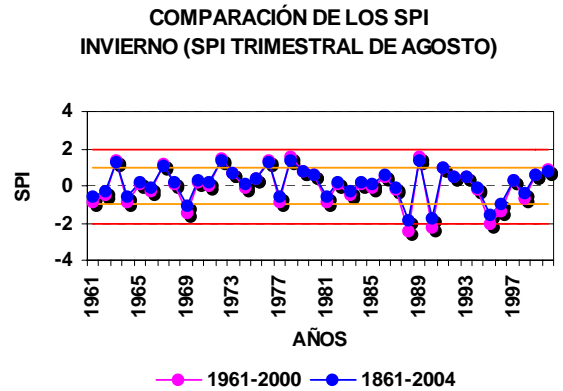


Fig. 6. Comparación de los SPI-3 de agosto (invierno), calculados para los periodos 1861-2004 y 1961-2000

En cuanto a la duración de los eventos, de acuerdo las categorías establecidas, se computó la cantidad de meses consecutivos en que el SPI es superior (o inferior) a cero y a esos periodos se les asignó la categoría correspondiente al máximo (o mínimo) valor obtenido respectivamente durante ese lapso de tiempo. Así, de acuerdo al SPI-1 (Figura.1), el evento de máxima duración correspondió a una sequía moderada que se extendió por 15 meses consecutivos, hasta junio de 1893 (Figura 7), la cual tuvo una magnitud (definiéndose como magnitud a la suma de los SPI del periodo considerado, McKee y otros, 1993) de -10.0 y una magnitud promedio de -0.7; le siguen en duración varios periodos húmedos de 10, 11 y 12 meses. En cuanto a la sequía más importante, cabe citar la que se extendió hasta octubre de 1916 por 9 meses consecutivos; durante ella se registró un SPI mínimo de -3.599, la magnitud de este episodio fue de -12.4 y su magnitud promedio de -1.4.

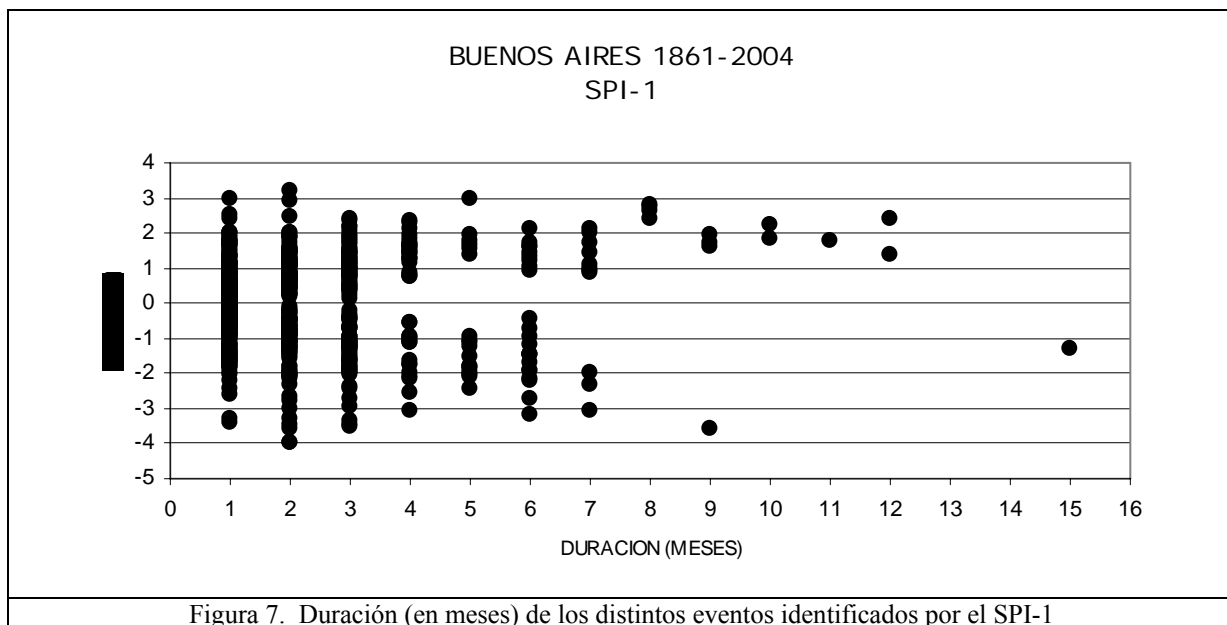


Figura 7. Duración (en meses) de los distintos eventos identificados por el SPI-1

En cuanto a los eventos de sequías extremas (Tabla 8), en el período 1961-2004 ha habido una marcada disminución en el número de los mismos, y sólo se registran eventos de 2, 3, 5 y 6 meses.

PERIODO	CASOS	DURACION (MESES)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1861-2004	46	13	37	20	9	7	9	4	0	2	0	0	0	0	0	0
1861-1910	18	4	17	2	4	2	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0
1911-1960	22	9	17	11	4	2	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0
1961-2004	6	0	2	7	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 8. Sequías extremas ($SPI \leq 2$). Número de casos según períodos de tiempo y porcentaje de ocurrencia según duración

Si consideramos los eventos de sequías severas (Tabla 9), en el período 1961-2004 también ha habido una marcada disminución en el número de los mismos. Resultados similares se obtienen para los SPI-3, SPI-6, SPI-12, SPI-18 y SPI-24.

PERIODO	CASOS/	DURACION (MESES)														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1861-2004	134	34	22	26	5	6	5	1	0	0	0	0	0	0	0	1
1861-1910	52	12	5	12	1	4	3	1	0	0	0	0	0	0	0	1
1911-1960	47	13	7	9	1	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1961-2004	35	9	9	5	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 9. Sequías severas ($2 < SPI \leq 1$). Número de casos según períodos de tiempo y porcentaje de ocurrencia según duración

CONCLUSIONES

La prueba de concepto del SPI realizada en base a los datos de precipitación de Buenos Aires ha demostrado que este índice es adecuado para la identificación y seguimiento de eventos secos y húmedos en la región húmeda argentina, donde la función Gamma proporciona un ajuste adecuado a los datos de precipitación. Su utilización en otras regiones de Argentina, como el NOA, puede presentar algún inconveniente debido al régimen marcadamente estacional de la precipitación.

Asimismo, el SPI se muestra como una herramienta versátil para el estudio de la climatología de los eventos secos y/o húmedos. Aplicado a la serie de precipitación Buenos Aires, ha permitido visualizar la tendencia positiva observada en esta variable desde la segunda mitad del siglo XIX hasta la actualidad, permitiendo reconocer singularidades de interés como la no ocurrencia de sequías severas y extremas de más de 12 meses de duración en todo el período, la mayor frecuencia de sequías moderadas en el período 1861-1910 y la mayor frecuencia de excesos extremos y severos de 24 meses de duración en los últimos 44 años. En cuanto a la duración de los eventos sequía severa y sequía extrema se verifica que en el período 1961-2004 ha habido una marcada disminución en el número de los mismos.

BIBLIOGRAFIA

- Almeira, G., Ciappesoni, H., Goniadzki, D., Scian, B. 2004. Índice de Precipitación Estandarizado: Una Aplicación en el Litoral Argentino. X Reunión Argentina y IV Latinoamericana de Agrometeorología. Mar del Plata. Argentina.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wilhite, D., Vanyarkho, O. 1999. American Meteorology Society.
- Heim, R. A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. 2002. American Meteorological Society.
- Lloyd-Hughes, B., Saunders, M. 2002. A Drought Climatology for Europe. International Journal of Climatology. Int. J. Climatol.22: 1571-1592 (2002).
- Mckee, T., Doesken, N., Kleist, J. 1993. Eight Conference on Applied Climatology.
- Scian, B. 1997 Comparación entre el Índice de Precipitación Estandarizado y otros Índices Hidrológicos para la Región Pampeana. Meteorológica. Centro Argentino de Meteorólogos. Volumen 22 - Número 2 - Año 1997
- Seiler, R., Hayesm M. and L. Bressan. 2002. Using the Standardized Precipitation Index For Flood Risk Monitoring. International Journal of Climatology 22: 1365–1376 (2002)
- Thorn, H.C.S., 1966: Some Methods of Climatological Analysis. WMO Technical Note Number No. 81, 81 16-22.
- Wilhite, D. A. 2000. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In: Drought: A Global Assessment, edited by Wilhite, D. A., Routledge, 3–18.
- WMO. 1975. Drought and Agriculture. Technical Note. N° 138. WMO - N° 392
- Young, K.C. 1992. A Three-Way Model for Interpolating for Monthly Precipitation Values. Monthly Weather Review, 120, 2561-2569 pp.