

Tendencias a Largo Plazo en la Precipitación Extrema en Tucumán

Flavia M. Bazzano^{1,2}, Teresita Heredia³ y Ana G. Elias^{2,3}

¹Laboratorio de Construcciones Hidráulicas, Dpto. de Construcciones y Obras Civiles, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET

³Laboratorio de Física de la Atmósfera, Dpto. de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán

E-mail:flaviabazzano@gmail.com

RESUMEN: Se analizan las lluvias extremas registradas en Tucumán (26,79° S, 65,20° W) durante el período 1974-2014 para detectar tendencias a largo plazo y sus posibles causas. Las variaciones de frecuencia e intensidad son estudiadas en el contexto del calentamiento global y de forzantes naturales, tales como El Niño, medido a través del Índice de Oscilación del Sur (SOI), y el Modo Anular del Sur (SAM). Se encuentran tendencias lineales negativas en tres de los cuatro índices extremos analizados, aunque resultan estadísticamente significativas solo en los casos de la precipitación total anual y del número de días con precipitación por año. Este resultado no concuerda con el efecto del calentamiento global esperado sobre Tucumán, según el cual aumentaría la precipitación en la región. Se observan otras variaciones a largo plazo que podrían estar relacionadas con los patrones de variabilidad climática de gran escala de la SAM y El Niño. Este trabajo pretende contribuir al estudio de los eventos extremos, cuya importancia reside en su aplicación en la planificación de estrategias de mitigación de daños y de adaptación, ya que las lluvias máximas son uno de los factores causantes de las recurrentes inundaciones en la región.

INTRODUCCIÓN

Las variaciones en la frecuencia y magnitud en los eventos climáticos extremos tienen un profundo impacto tanto en la sociedad como en los ecosistemas naturales. Numerosos estudios muestran que existe un incremento de la temperatura global media de aproximadamente 0,8°C desde 1880 (IPCC,2014). La precipitación no está exenta de modificaciones, aunque su variación es menos homogénea que la temperatura (Trenberth, 2011). Las tendencias observadas en los eventos climáticos extremos son motivo de numerosos estudios recientes, en vista de sus consecuentes daños y costos derivados de ellos (Meehl *et al.*, 2000; IPCC,2014; Easterling *et al.*, 2000). Los extremos climáticos, en especial las tormentas intensas, presentan naturalmente una amplia variabilidad espacial, siendo frecuentes las inundaciones y sequías simultáneas en diferentes regiones del planeta (Kunkel *et al.*, 2008; Seneviratne *et al.*, 2012).

Centrándose en América del Sur, Haylock *et al.* (2006) realizaron un análisis exhaustivo de la precipitación total y extrema, concluyendo que los patrones de tendencia eran similares en ambos casos. Las tendencias observadas fueron decrecientes en el sur de Perú y sur de Chile, mientras que, en Ecuador, norte de Perú, sur de Brasil, Paraguay, Uruguay y norte de Argentina se obtuvo un resultado opuesto.

Situada en el noroeste de Argentina, la provincia de Tucumán presenta antecedentes en el estudio de tendencias en la precipitación anual por su gran influencia en la actividad agrícola, siendo el cultivo de caña de azúcar, limón y soja la principal actividad económica de la región. Minetti y Vargas (2003) concluyen que el total anual precipitado presenta una tendencia cuasi – lineal creciente en el período 1930 a 2000, con la consecuente expansión en las áreas cultivadas que cubre actualmente el total apto para producción. Además, se han estudiado los eventos pluviales extremos, siendo los máximos registrados uno de los factores causantes de las recurrentes inundaciones en la región y de la erosión hídrica que degrada los suelos agrícolas y ocasiona daños a la infraestructura (Lamelas *et al.*, 2004). Los parámetros de diseño con que se dimensionaran las obras de prevención y mitigación de dichos impactos se derivan de modelos de predicción que requieren verificar la estacionariedad del fenómeno e incorporar a los mismos las tendencias significativas encontradas, si las hubiere, asegurando así verosimilitud de las estimaciones que de ellos se deriven (Bazzano *et al.*, 2015).

El objetivo de este trabajo es detectar tendencias a largo plazo en la precipitación extrema en Tucumán y analizar sus posibles causantes, teniendo en cuenta tanto forzantes naturales como antropogénicos.

ANALISIS DE DATOS

Sistema experimental

El régimen de precipitación en Tucumán es subtropical (Prohaska, 1976), con una alta concentración estival de la precipitación, ocurriendo entre noviembre y marzo entre el 50% y el 80% de las lluvias anuales, seguidas de una estación invernal seca. El período lluvioso coincide con la estación monzónica en América del Sur (diciembre a febrero) (Marengo *et al.*, 2012; Boers *et al.*, 2015).

De acuerdo a Minetti y Vargas (2005), los factores determinantes en la generación de precipitaciones de la zona estudiada, son la depresión continental con gran influencia en los procesos de transporte-convergencia de humedad hacia el continente, el calentamiento continental y el régimen estacional de la presión atmosférica.

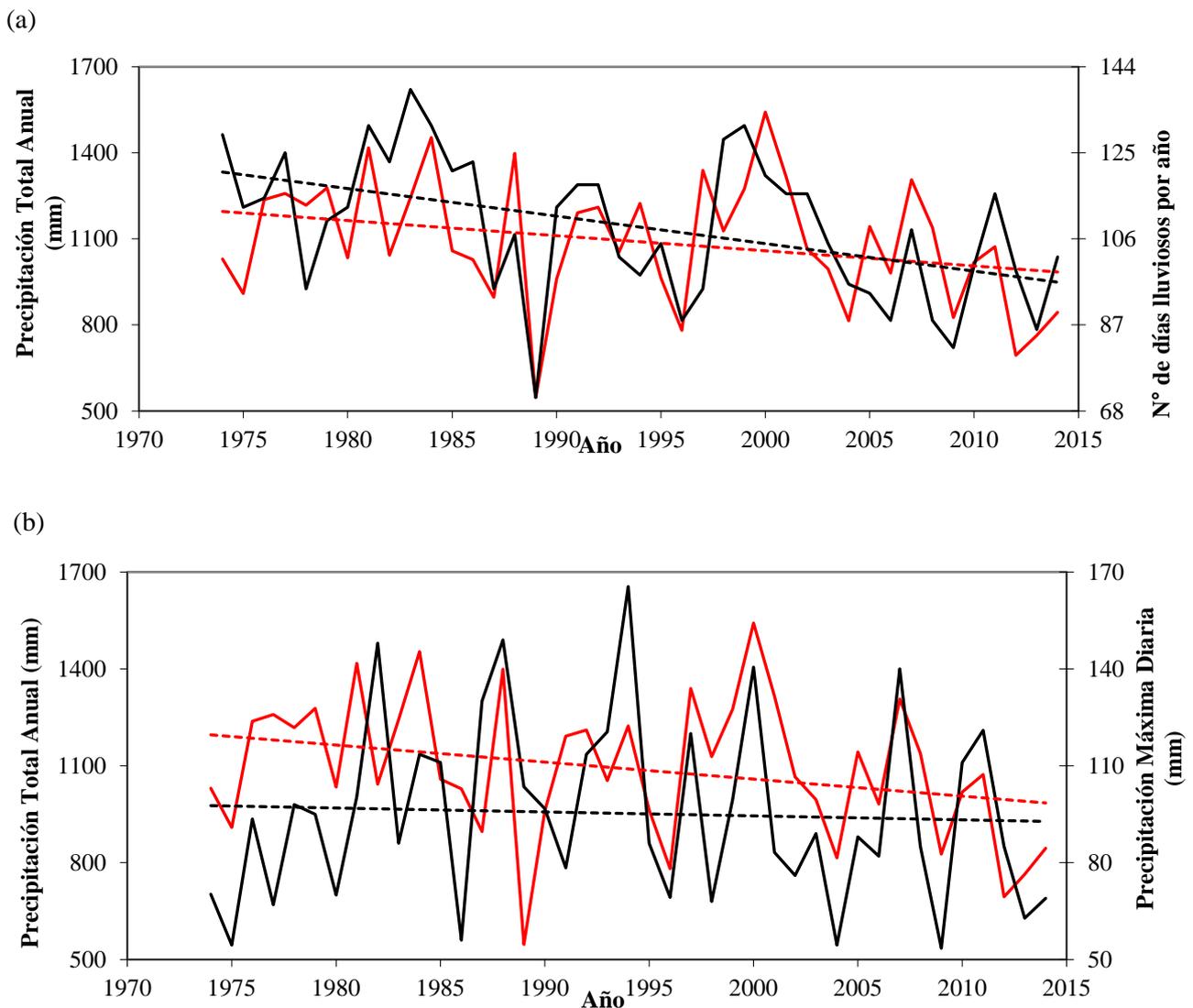
La localidad estudiada se encuentra emplazada en un área de transición de tres grandes unidades geológicas: las sierras pampeanas al oeste (sierras de San Javier), las sierras subandinas al norte (sierras de La Ramada y de Medina) y la llanura chaco-pampeana hacia el sur. Esto resulta en una gran variabilidad espacial de la precipitación, fuertemente influenciada por la presencia de una importante divisoria de aguas/vapor dada por el cordón montañoso al oeste y las sierras del norte que, aunque son de menor altura, condicionan la génesis de las precipitaciones en la región estudiada. Siendo esta región pedemontana, es receptora de una densa red de ríos provenientes de zonas montañosas aledañas, por lo que deberá tomarse especial recaudo para encauzar y controlar los excedentes hídricos, dado que las zonas bajas con menores gradientes topográficos son más propensas a tener inundaciones.

Series de precipitación

La alteración en la cantidad de agua precipitada puede darse solo por cambios en la frecuencia de eventos, o por una variación en la magnitud de cada uno de ellos, o por ambos factores simultáneamente (Karl y Knight, 1998). Es por ello que se considerará la precipitación máxima diaria anual (PMD) para detectar variaciones en la intensidad, y el número de días por año con precipitación mayor a los percentiles 90, 95 y 99 (NP90, NP95 y NP99) para analizar cambios en la frecuencia. También se incorpora el número de días con lluvia por año (0,1mm o más) y los totales anuales precipitados.

La precipitación diaria fue registrada en el periodo 1974 a 2014 en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) ubicada en el departamento de Tafí Viejo (26,79°S, 65,20°W), en las cercanías de la capital provincial. El periodo seleccionado corresponde a un registro completo medido en una misma ubicación. Percentiles fueron calculados para todo el periodo de análisis resultando P95 = 27mm, P95 = 41mm, y P99 = 77mm.

En la Figura 1 se presentan las series de datos con sus correspondientes líneas de tendencias.



(c)

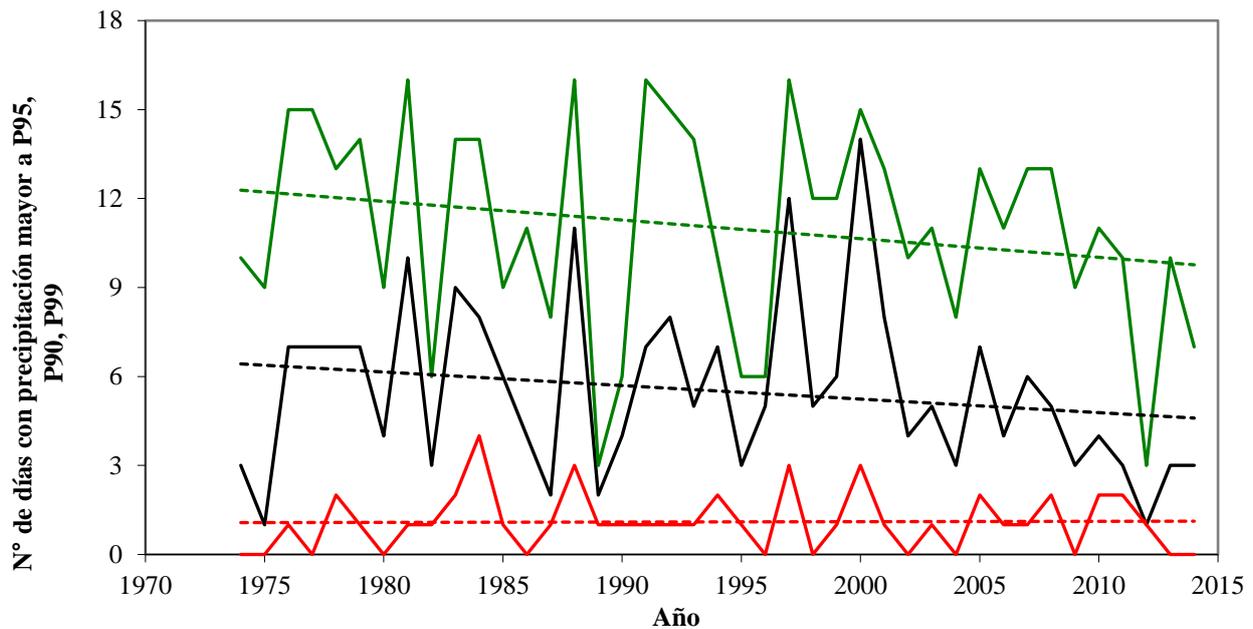


Figura 1.- (a) Precipitación total anual (línea roja) y número de días con lluvia mayor a 0,1mm (línea negra). (b) Precipitación total anual (línea roja) y precipitación máxima diaria anual (línea negra). (c) Número de días con precipitación mayor que los percentiles 90 (línea verde), 95 (línea negra) y 99 (línea roja) (P90, P95 y P99 respectivamente). Las líneas de puntos corresponden a las tendencias lineales (ver valores en la Tabla 1).

Forzantes de las tendencias a largo plazo

Existen diversos forzantes de las anomalías en la precipitación, ciertos causantes son de origen natural como el fenómeno de El Niño, caracterizado mediante el Índice de la Oscilación del Sur (SOI, Southern Oscillation Index) y el Modo Anular del Sur (SAM, Southern Annular Mode), mientras que otros son antropogénicos como el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera.

El índice de la Oscilación del Sur se basa en la diferencia de presiones atmosféricas a nivel del mar entre Tahití y Darwin y es una medida de la fluctuación a gran escala de la presión del aire entre las regiones tropicales este y oeste del Pacífico durante los episodios El Niño y La Niña. La fase negativa del SOI representa presión por debajo de lo normal en Tahití y por encima de lo normal en Darwin. Períodos prolongados de SOI negativo corresponde a temperaturas del agua más cálidas que las usuales en la zona Este del Pacífico tropical, que es lo que se conoce como episodio de El Niño. Valores de SOI positivo corresponde a temperaturas del agua más frías que las usuales en la zona Este del Pacífico tropical, y es lo que se conoce como episodio de La Niña.

Los datos del SOI se obtienen de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera de Estados Unidos de América (<https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/>).

Hay indicios de la influencia del SOI en la precipitación en Sudamérica, donde durante episodios El Niño se experimentan condiciones más húmedas que lo normal en el sur de Brasil y norte de Argentina. En particular

en Argentina, Robledo *et al.* (2015) encontraron un rol dominante de El Niño evidenciado con la influencia de la temperatura del mar en la magnitud de la precipitación máxima diaria en Argentina.

El SAM, también conocido como la Oscilación Antártica, se refiere al desplazamiento meridional del cinturón de vientos del oeste que rodea a la Antártida. Este desplazamiento afecta la intensidad y posición de los frentes fríos y sistemas de tormentas de latitudes medias en el Hemisferio Sur, en diversas escalas de tiempo, desde estacional hasta decadales (Hall y Visbeck, 2002).

Valores positivos de SAM corresponden a una contracción del cinturón de vientos del oeste y resulta en vientos más débiles y presiones más altas, mientras que valores negativos de SAM corresponden a una expansión del cinturón de vientos hacia el ecuador. Los datos de SAM fueron provistos por el British Antarctic Survey (<http://www.nerc-bas.ac.uk/icd/gjma/sam.html>) (Marshall, 2003).

Hay varios ensayos que muestran la influencia del SAM en la precipitación en América del Sur (Silvestri y Vera, 2003). En el presente sistema experimental, González *et al.* (2012) analizan la llanura chaqueña argentina, que incluye parte de la provincia de Tucumán, obteniendo una leve correlación negativa durante el verano con un nivel de significancia de 10%.

El índice de actividad geomagnética, aa, y el número de manchas solares, Rz, se obtuvieron del National Geophysical Data Center (<ftp://ftp.ngdc.noaa.gov>).

En cuanto al forzante antropogénico, se encuentran análisis sobre sus efectos en los extremos hidrológicos en numerosos estudios (IPCC, 2007; Trenberth, 2011; Fu *et al.*, 2013). Esto se debe a que el aumento en la temperatura generado por el efecto invernadero acrecentaría la humedad atmosférica, dado que la capacidad de retener agua en la atmósfera se incrementa alrededor de un 7% por cada °C de incremento en la temperatura. Según el reporte del IPCC, el vapor de agua en la atmósfera en el siglo 20 se ha incrementado en un 5% sobre los océanos. Como la precipitación se debe principalmente a sistemas climáticos alimentados por vapor de agua almacenado en la atmósfera, el efecto final sería un aumento en la intensidad de las precipitaciones, con riesgo de lluvias intensas. La teoría básica, modelos climáticos y evidencia empírica predicen que climas más cálidos, resultan en precipitaciones más intensas al aumentar la cantidad de vapor de agua aun cuando la precipitación total anual se reduzca (IPCC, 2007).

Algunos patrones de gran escala de tendencias en la precipitación son evidentes (Trenberth, 2011): mermas en el Mediterráneo, sur de Asia y África, los subtrópicos y trópicos fuera del estrecho monzónico e incrementos en latitudes altas sobre Norte América, Eurasia y Argentina. En particular en Tucumán, la situación es intermedia entre el trópico y el subtrópicos, y se esperan tendencias crecientes.

ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Para detectar tendencias se utilizó la prueba de Mann-Kendall, ampliamente utilizada con este fin en series temporales climáticas e hidrológicas (Hamed, 2008). La principal ventaja de la prueba es que al ser no paramétrico no requiere que los datos estén distribuidos normalmente.

Para una serie de tiempo $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ el estadístico de la prueba de Mann-Kendall viene dado por:

$$S = \sum_{i < j} \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_i < x_j \\ 0 & \text{si } x_i = x_j \\ -1 & \text{si } x_i > x_j \end{cases} \quad (1)$$

El signo de $(x_j - x_i)$ para $i < j$ es igual al signo de la diferencia de rango entre datos. Esto quiere decir que S depende no del valor de x si no de su rango, y que no se afecta por la distribución de los datos. Bajo suposición de independencia de los datos, la varianza de S viene dada por (Kendall, 1975):

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (2)$$

Donde n es el número de observaciones (igual a 41 en nuestro caso). Esta varianza se reduce cuando hay observaciones iguales en las series de datos, siendo:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

Donde m es el número de pares con observaciones equivalentes.

Para muestras grandes ($n > 10$) como la de nuestro caso, se asume que S se distribuye normalmente, con lo que la significancia estadística puede ser determinada a través del estadístico estandarizado Z que tiene una distribución normal:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

La sustracción o adición de la unidad es una corrección que tiene en cuenta que S es una variable discreta y que consideramos una distribución continua (Kendall, 1975).

Cuando la serie temporal esta correlacionada se considera un tamaño de muestra efectivo, con el objetivo de eliminar el efecto de la correlación serial en la prueba de tendencias (Hamed y Rao, 1998). En este caso la Var(S) viene dada por:

$$Var^*(S) = Vas(S) \times \left[1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \times \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)\rho_s(i) \right] \quad (5)$$

donde $\rho_s(i)$ es la autocorrelación de los rangos de las observaciones.

Para cuantificar la tendencia utilizamos el estimador no paramétrico de Sen (1968) dado por:

$$\beta = mediana \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \forall i > j \quad (6)$$

donde β representa la mediana de las pendientes existentes entre todos los pares de datos.

La Tabla 1 presenta los valores de β y de p utilizando las expresiones (3) y (5) que son las tendencias de las estimadas por la prueba de Mann Kendall (p_{MK}) y su versión modificada (p_{MKmod}) respectivamente, junto a las tendencias estimadas por mínimos cuadrados ordinarios (MCO) para su comparación. Si elegimos trabajar con un nivel de significancia de 5% (o $p=0,05$), solo la precipitación total (PT) y el número de días lluviosos al año (N) presentan una tendencia decreciente significativa. Sin embargo, el número de días con precipitación mayor a los percentiles 90 y 95 (NP90 y NP95) presentan un valor relativamente bajo de p , por lo que podrían también considerarse significativas.

Tabla 1.- Tendencia no paramétrica de Sen, p obtenido en la prueba de Mann-Kendall, p correspondiente a su versión modificada y la pendiente estimada por mínimos cuadrados ordinarios.

	Sen	p_{MK}	p_{MKmod}	MCO
Precipitación total anual	-5,46 mm/año	0,0409	0,0409	-5,27 mm/año
Precipitación máxima diaria anual	-0,11 mm/año	0,3336	0,3348	-0,12 mm/año
Nº de días lluviosos al año (>0,1mm)	-0,67 días/año	0,0009	0,0000	-0,61 días/año
Nº de días al año con precipitación > P90	-0,07 días/año	0,0655	0,0662	-0,063 días/año
Nº de días al año con precipitación > P95	-0,06 días/año	0,0571	0,1062	-0,046 días/año
Nº de días al año con precipitación > P99	0,00 días/año	0,3859	0,4063	-0,001 días/año

ASOCIACIÓN CON FORZANTES NATURALES

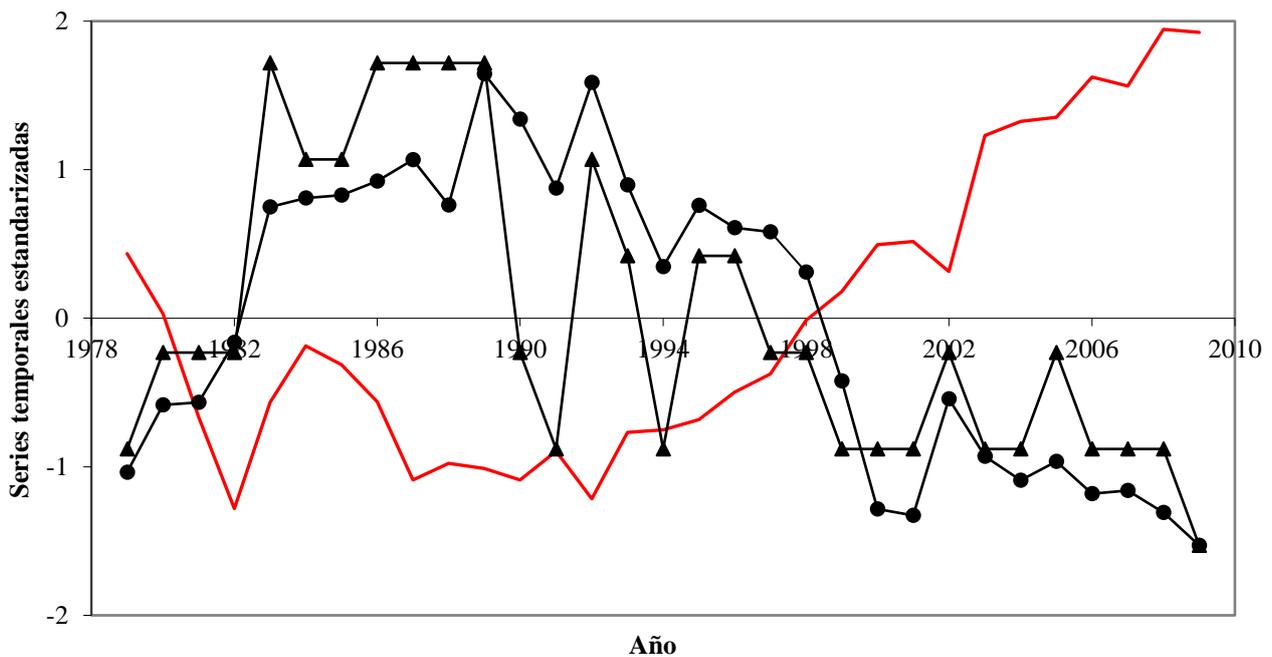
Para analizar variaciones a largo plazo utilizamos el promedio móvil de 11 años de cada serie temporal (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La forma más simple de analizar la posible asociación entre los forzantes naturales y los índices de precipitación es mediante coeficientes de correlación (Tabla 2). La significancia estadística de dichos coeficientes fue definida mediante el estimador t :

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (7)$$

Donde N es el número de datos independientes en cada serie correlacionada. En el caso de series anuales, N=41 mientras que, para el promedio móvil de 11 años, N será igual al número de datos divididos en 11 (N=4). En este caso, las correlaciones son significantes en 0,05 y 0,10 para coeficientes de correlación 0,83 y 0,73 respectivamente. Se obtiene, entonces, solo una correlación negativa entre SOI y la precipitación máxima diaria anual (PMD) y dos correlaciones positivas entre el índice de actividad geomagnética (aa) y la PMD y entre el número de manchas solares (Rz) y N. Sin embargo, hay correlaciones apreciables entre SOI y NP99 y entre SAM y N, NP99 y PMD. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las series suavizadas donde se aprecia una notable anti correlación con los índices de forzantes naturales.

Tabla 2.- Coeficiente de correlación lineal entre los índices de forzantes naturales y las series de precipitación. (** y * indican significancia a un nivel de 0,05 y 0,10 respectivamente)

	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN			
	SOI	SAM	Rz	aa
Precipitación total anual	-0,30	-0,17	0,49	0,45
Precipitación máxima diaria anual	-0,86**	-0,54	0,72	0,75*
Nº de días lluviosos al año (>0,1mm)	-0,54	-0,62	0,79*	0,70
Nº de días al año con precipitación > P90	-0,09	-0,01	0,22	0,22
Nº de días al año con precipitación > P95	-0,52	-0,04	0,56	0,60
Nº de días al año con precipitación > P99	-0,64	-0,61	0,70	0,65



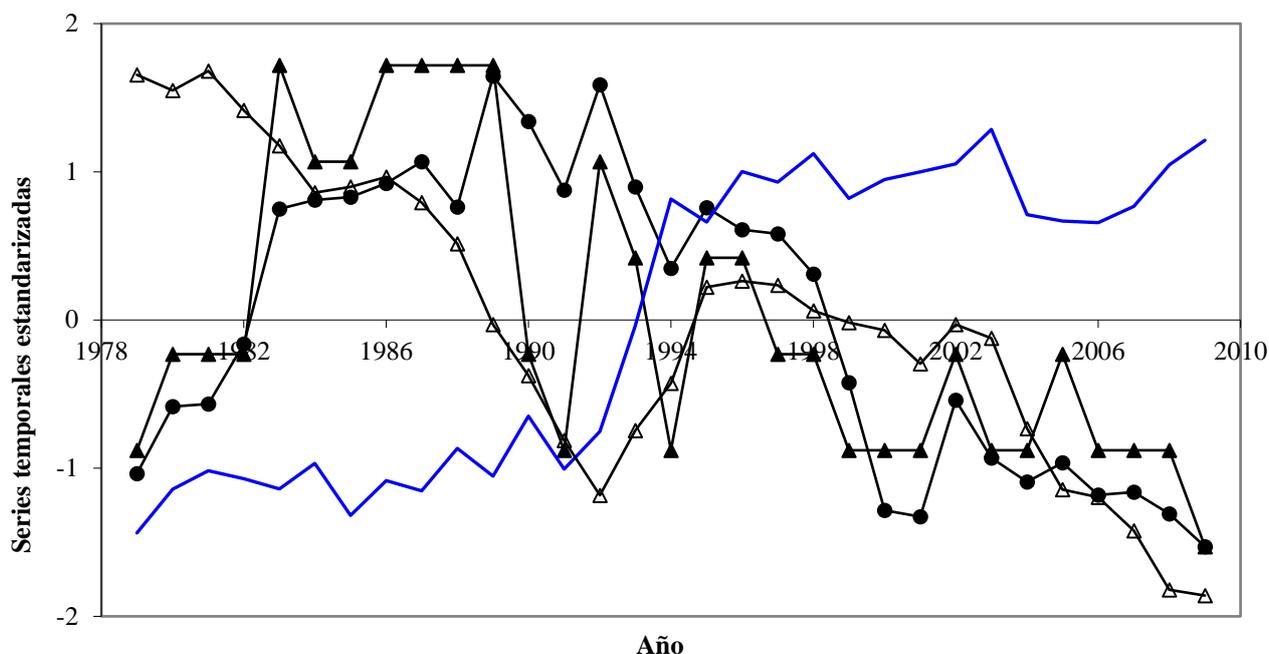


Figura 2.- Promedio móvil de 11 años de (a) SOI (línea roja), precipitación máxima diaria anual (círculos sólidos) y número de días con lluvia mayor que P99 (triángulo sólido), y (b) SAM (línea azul), precipitación máxima diaria anual (círculos sólidos) y número de días con lluvia mayor que P99 (triángulo relleno), y número de días lluviosos al año (triángulos sin relleno). (Nota: todas las series se encuentran estandarizadas).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Algunas causantes de las tendencias a largo plazo y la variabilidad de la precipitación extrema son el SOI, SAM, la actividad solar y geomagnética y el calentamiento global. Estos factores no son independientes entre sí, especialmente el SOI y el SAM que pueden ser afectadas por el incremento de los gases de efecto invernadero (IPCC,2007).

En el caso de Tucumán, la relación entre las tormentas extremas y los índices del SOI y el SAM varían según la escala temporal y el período de tiempo. Resultados similares fueron observados en China (Fu *et al.*, 2013).

En nuestro caso, se obtuvo una tendencia decreciente en Tucumán, aunque no significativa estadísticamente para los índices de precipitación extrema, que no coincide con la tendencia creciente esperada para la región. Esto puede deberse al corto periodo analizado, representando una merma parcial en un aumento general si se retrocediera hacia atrás en el tiempo. De hecho, Heredia y Elías (2013) observaron un aumento generalizado en la precipitación media mensual en el periodo 1884 – 2010, lo que concuerda con el efecto causado por el incremento de gases de efecto invernadero. Además, las variaciones a largo plazo de los forzantes naturales como son el SOI y el SAM, pueden estar contrarrestando el efecto antropogénico en la precipitación en la localidad analizada.

Queda por realizar mucho trabajo con series temporales mayores. En el caso de series de eventos extremos, comparadas a otros parámetros climáticos como valores medios, son más difíciles de encontrar dado que están basados en registros diarios. Lo que es seguro es que los cambios en la precipitación máxima generan un mayor

impacto en la sociedad que cualquier pequeño cambio en las condiciones climáticas medias (Zhang *et al.*, 2008).

REFERENCIAS

- Bazzano, F.; Caamaño Nelli, G.; Rajmil, G. 2015 “Predicción de lluvias máximas en la provincia de Tucumán con el Modelo DIT”. XXV Congreso Nacional del Agua. Paraná, Argentina.
- Boers, N., H.M.J. Barbosa, B. Bookhagen, J.A. Marengo, N. Marwan, y J. Kurths, 2015. Propagation of Strong Rainfall Events from Southeastern South América to the Central Andes, *Journal of Climate*, 28, 7641-7658.
- Easterling, D.R., J.L. Evans, P. Ya Groisman, T.R. Karl, K.E. Kunkel, P. Ambenje, 2000. Observed Variability and Trends in Extreme Climate Events: A Brief Review, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, 417-425.
- Fu, G., J. Yu, X. Yu, R. Ouyang, Y. Zhang, P. Wang, W. Liu, y L. Min, 2013. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961–2009, *Journal of Hydrology* 487, 48–59.
- Gonzalez, M.H., Cariaga, M.L., Skansi, M.M., 2012. Some Factors That Influence Seasonal Precipitation in Argentinean Chaco, *Advances in Meteorology*, Volume 2012, doi:10.1155/2012/359164.
- Hall, A. y M. Visbeck, 2002. Synchronous Variability in the Southern Hemisphere Atmosphere, Sea Ice, and Ocean Resulting from the Annular Mode. *J. Climate*, 15, 3043-3057.
- Hamed K. H. y Rao, A.R. (1998) A modified Mann-Kendall Trend Test for Autocorrelated Data. *Journal of Hydrology*, 204, 182-196.
- Hamed, K.H., 2008. Trend detection in hydrologic data: The Mann–Kendall trend test under the scaling hypothesis, *Journal of Hydrology*, 349, 350– 363, doi:10.1016/j.jhydrol.2007.11.009.
- Haylock, M.R., T.C. Peterson, L.M. Alves, T. Ambrizzi, Y.M.T. Anunciação, J. Baez, V.R. Barros, M.A. Berlato, M. Bidegain, G. Coronel, V. Corradi, V.J. Garcia, A.M. Grimm, D. Karoly, J.A. Marengo, M.B. Marino, D.F. Moncunill, D. Nechet, J. Quintana, E. Rebello, M. Rusticucci, J.L. Santos, I. Trebejo, y L. A. Vincent, 2006. Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature, *Journal of Climate*, 19, 1490-1512.
- Heredia, T. y A.G. Elias, A study on possible solar and geomagnetic effects on the precipitation over northwestern Argentina, *Advances in Space Research*, 51, 1883–1892, 2013.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom y New York, NY, USA, 996 pp.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Karl, T.R. y R.W. Knight, 1998. Secular Trends of Precipitation Amount, Frequency, and Intensity in the United States, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 231–241.
- Kendall, M.G., 1975. *Rank Correlation Methods*. Griffin, London, UK, 202 pp.
- Kunkel, K., *et al.*, 2008. Observed Changes in Weather and Climate Extremes, in *Weather and Climate Extremes in a Changing Climate Regions of Focus: North América, Hawaii, Caribbean, and U.S. Pacific Islands*, a Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research [edited by Thomas R. Karl, Gerald A. Meehl, Christopher D. Miller, Susan J. Hassol, Anne M. Waple, y William L. Murray], 35-80.
- Lamelas, C.M.; Forciniti, J.D.; Colacelli, N. y Delgado, J.. 2004. Estimación de la agresividad pluvial en la Provincia de Tucumán - Argentina. X Argentina y IV Reunión Latinoamericana de Agrometeorología. Mar del Plata, Argentina. Actas Pub. en CD.
- Marengo, J.A., *et al.*, 2012: Recent developments on the South American monsoon system. *Int. J. Climatol.*, 32, 1–21, doi:10.1002/joc.2254.
- Marshall, G. J., 2003. Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses. *J. Clim.*, 16, 4134-4143.
- Meehl, G.A., T. Karl, D.R. Easterling, S. Changnon, R. Pielke Jr., D. Changnon, J. Evans, P. Ya Groisman, T.R. Knutson, K.E. Kunkel, L.O. Mearns, C. Parmesan, R. Pulwarty, T. Root, R.T. Sylves, P. Whetton, and F. Zwiers, 2000. An Introduction to Trends in Extreme Weather and Climate Events: Observations, Socioeconomic Impacts, Terrestrial

- Ecological Impacts, and Model Projections, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, 413-416.
- Minetti, J.L. y Vargas, W.M., Poblete, A.G., Acuña, L.R. y Casagrande, G., 2003. Non-linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999, *Atmosfera*, 16, 119-135.
- Minetti, J. L. y Vargas W. M. (2005) "Circulación Regional en el Noroeste Argentino y Condiciones del Tiempo Asociadas". Cap. 4 en *El Clima en el NOA*. 410 páginas. ISBN: 987-9390-66-0. Edit. Magna. S Miguel de Tucumán. Tucumán. Argentina
- Prohaska, F., 1976. The Climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. In Schwerdtfeger, W. (ed.), *Climates of Central and South América*. World Survey of Climatology, Elsevier, Amsterdam, pp. 13-73.
- Robledo, F.A., Vera, C., Penalba, O.C., 2015. Influence of the large-scale climate variability on daily rainfall extremes over Argentina. *Int. J. Climatol.*. doi: 10.1002/joc.4359.
- Sen, P.K., 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J. Am. Statist. Assoc.* 63, 1379–1389.
- Seneviratne, S.I., *et al.*, Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment, in IPCC, 2012. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp, 109-230.
- Silvestri, G.E., Vera, C.S., 2003. Antarctic Oscillation signal on precipitation anomalies over southeastern South América, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 2115, doi:10.1029/2003GL018277.
- Trenberth, K.E., 2011. Changes in precipitation with climate change, *Clim. Res.*, Vol. 47: 123–138, doi: 10.3354/cr00953.
- Zhang, Q., C.Y. Xu, Z. Zhang, Y.D. Chen, C. Liu, y H. Lin, Spatial and temporal variability of precipitation maxima during 1960–2005 in the Yangtze River basin and possible association with large-scale circulation, *Journal of Hydrology* (2008) 353, 215– 227.