

**TENDENCIAS EN LA PRECIPITACIÓN EN TUCUMÁN BAJO EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**Flavia M. Bazzano<sup>1,2</sup>, Teresita Heredia<sup>3</sup>, Ana G. Elías<sup>2,3</sup>, César M. Lamelas<sup>4</sup> y Jorge Forciniti<sup>4</sup><sup>1</sup>Laboratorio de Construcciones Hidráulicas, FACEyT, UNT<sup>2</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET<sup>3</sup>Laboratorio de Física de la Atmósfera, Dpto. de Física, FACEyT, UNT<sup>4</sup>Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes

(Manuscrito recibido el 19 de octubre de 2017, en su versión final el 22 de abril de 2018)

**RESUMEN**

La evidencia empírica, así como las simulaciones, indican que el calentamiento global induciría un aumento en la humedad del aire y en la intensidad de las precipitaciones en algunas regiones del planeta. Tal es el pronóstico para la provincia de Tucumán comprendida entre las latitudes 26,1°S y 27,8°S y longitudes 64,8°W y 66,0°W que se encuentra en una región geográfica intermedia entre tropical y subtropical. Es allí donde, a partir de los registros diarios de lluvia de 20 estaciones, se analizaron las tendencias en la precipitación total anual, máxima diaria y número de días con precipitación mayor al percentil 95. El análisis se realiza en el período de registro coincidente de las estaciones (1973 a 2015), extendiéndose a un período mayor (1954 a 2016) en las 3 estaciones donde la información lo permite. Las tendencias significativas negativas predominan en la región tanto en los totales anuales como en la cantidad de episodios intensos en el período 1973 a 2015. Sin embargo, en las estaciones con periodos más extensos prevalecen las tendencias positivas significativas. No se observan tendencias significativas en los máximos diarios anuales, excepto en una estación. El análisis estadístico de las series históricas realizado representa una importante herramienta que colabora en la toma de decisiones a fin de mitigar los efectos del cambio climático en la región.

*Palabras clave: Precipitación, Tendencias a largo plazo, Cambio climático*

**LONG TERM-TRENDS IN RAINFALL OVER TUCUMAN UNDER THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE****ABSTRACT**

The empirical evidence, as well as the simulations, indicates that the global warming would induce an increase in the humidity of the air and in the intensity of precipitations in some regions of the planet. Such is the forecast for the province of Tucumán in the area within latitudes 26.1°S and 27.8°S and longitudes 64.8°W and 66.0°W, located in an intermediate geographical region between tropical and subtropical. From the daily rainfall records of 20 stations in Tucuman, trends in total annual precipitation, maximum daily and number of days with precipitation greater than the 95th percentile were analyzed. Significant negative trends predominate

over a few positive ones obtained in the region, both in the annual totals and in the number of intense episodes in the period 1973 to 2015. However, in the stations with longer periods prevail significant positive trends. On the other hand, in the annual daily maximum series prevail non-significant trends. The statistical analysis of the historical series is an important tool that collaborates in the decision making to mitigate the effects of climate change in the region.

*Keywords: Rainfall, Long term-trend, Climate change*

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa una alteración en el clima manifestado por modificaciones en las condiciones medias de sus distintos componentes, como la temperatura y la precipitación, o bien transformaciones en la forma en que ellos varían (o ambos factores a la vez), persistiendo la anomalía por un período extendido, se trate de décadas o un período aún mayor. Dichos cambios pueden deberse a procesos naturales, como cambios astronómicos o geológicos, o por efectos antropogénicos que modifican la composición natural de la atmósfera. Esto último ha sido mostrado ya en varios estudios donde se indica, en las últimas décadas, un incremento cuasi lineal en la concentración de CO<sup>2</sup> en la atmósfera (IPCC, 2007; Trenberth, 2011; Fu et al., 2013). Se proyecta que los cambios percibidos en la actualidad persistirán al menos durante este siglo, considerando un amplio rango de escenarios posibles para futuras emisiones de gases de efecto invernadero, aún bajo supuesto de reducción de emisiones (IPCC, 2007).

El aumento en la temperatura global ha sido materia de numerosos ensayos, al observarse un incremento de aproximadamente 0,8°C desde 1880 (IPCC, 2014). Se estima que el calentamiento global producirá un aumento de la humedad atmosférica ya que la capacidad de contener agua de la atmósfera aumenta en 7% por °C de aumento de temperatura. De acuerdo con reportes del IPCC, durante el siglo 20 el vapor de agua atmosférico aumentó alrededor de un 5% en la atmósfera sobre los océanos. Sin embargo, las anomalías en la precipitación no se dan de manera uniforme en el planeta (Trenberth, 2011; IPCC, 2014) sino

que se espera una redistribución latitudinal de la variable, con incrementos en las latitudes más altas, decrecimientos en los sub-trópicos y posibles cambios en los trópicos debido al desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (Zhang et al., 2007). Son notables las tendencias positivas en América del Norte, Eurasia y América del Sur, mientras que los resultados son opuestos en el Mediterráneo, sudeste de Asia y África (Trenberth, 2011). De igual forma, las tendencias a largo plazo de las precipitaciones intensas presentan una gran variabilidad geográfica (Seneviratne et al., 2012).

Haylock et al. (2006), en un extenso análisis de precipitación media y extrema de estaciones de América del Sur, mostraron que, para el Norte y Centro de Argentina tanto la precipitación media como la extrema presentan una tendencia a aumentar. Años más tarde, Skansi et al. (2013) observaron tendencias positivas en varios índices representativos tanto de la precipitación acumulada anual como de la magnitud y frecuencia de ocurrencia de valores extremos calculados promediados regionalmente en la porción sur del continente al este de la cordillera de los Andes. Sin embargo, al analizar el comportamiento local de dichos índices en diversos puntos de medición, los resultados mostraron un predominio de tendencias no significativas, con una alternancia de valores positivos y negativos que evidencian la gran variabilidad en las tendencias en la precipitación en la región. En particular, en la provincia de Tucumán los estudios antecedentes demuestran la existencia de una tendencia cuasi – lineal creciente en la precipitación anual en el período 1930 a 2000 (Minetti et al., 2003). Por su parte, Medina y Minetti (2004) postulan que

el incremento de la lluvia total anual observado se asocia a un cambio en los extremos diarios de precipitación, que también manifiesta una tendencia positiva creciente en la segunda mitad del siglo pasado en Tucumán.

A partir de los registros diarios de lluvias registrados en 20 estaciones ubicadas en la provincia de Tucumán, abarcando el período 1973 - 2015, se analizan en el presente trabajo las tendencias en la precipitación extrema y el patrón espacial de las mismas. El resultado obtenido se contrasta contra el observado en 3 estaciones en un período de registro más extenso desde 1954 hasta 2016. La comprensión de distribución espacial de las tendencias a largo plazo en la precipitación en la región se torna esencial para el desarrollo de estrategias para la adaptación y mitigación de los impactos del calentamiento global, donde su análisis cobra gran importancia en tanto se involucra materias tan diversas como son la generación de energía, prevención de inundaciones, obras de regulación de caudales, planes de emergencia temprana, entre otros.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 2.1 SISTEMA EXPERIMENTAL

El régimen de precipitación dominante en Tucumán es subtropical (Prohaska, 1976), con una alta concentración de la precipitación, ocurriendo en el período octubre - marzo más del 80 % de las lluvias anuales. El período lluvioso coincide con la estación monzónica en América del Sur (Marengo et al., 2012; Boers et al., 2015). Los factores determinantes en la generación de precipitaciones 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 (Minetti y Vargas, 2005). Además, es importante señalar la influencia de la corriente en chorro en capas bajas activa o jet subtropical durante el verano, que actúa sobre la ladera este de los Andes transportando humedad desde Amazonas

hacia la región norte de Argentina, Paraguay, Uruguay y el sur de Brasil (Doyle y Barros, 2002). Estudios previos evidenciaron que las condiciones ambientales generadas por el ingreso del jet más allá de los 25°S son altamente favorables a la intensificación de la precipitación (Nicolini et al., 2002), existiendo además una notable coincidencia entre la posición del núcleo del jet y la región con tendencias positivas en la precipitación en el país (Castañeda, 1995).

La gran variabilidad climática que posee la provincia de Tucumán, producto de la influencia de los cordones montañosos que la atraviesan, genera regiones con condiciones hídricas bien diferenciadas en una superficie que apenas supera los 20000 km<sup>2</sup>. Es así como las lluvias afectadas por la topografía presentan un gradiente en dirección Este-Oeste muy pronunciado desde la provincia de Santiago del Estero. En esta región de pie de monte, el hombre asentó su principal actividad, la agricultura. Precisamente por ser un gradiente importante de precipitación, la superficie bajo cultivo es heterogénea, ya que en cortas distancias las características agroecológicas cambian en forma significativa. Ascendiendo en esta dirección, se alcanza un máximo pluvial entre 1000 y 1500 m.s.n.m., al encontrarse los vientos húmedos con una sierra de ladera simple de gran altura como es la Sierra del Aconquija donde se superan los 2000 mm anuales de lámina precipitada. El análisis en dirección Sur-Norte es más complejo por la alternancia entre cumbres y valles de diversa elevación presentes al NE de Tucumán. En este caso las sierras de La Ramada y Medina por su escasa elevación, que no llega a los 1000 m.s.n.m. promedio, no alcanzan a producir un máximo importante de precipitación que apenas supera los 900 mm sobre la sierra de La Ramada y los 800 mm en la sierra de Medina. Posteriormente sobre la ladera de las Cumbres Calchaquies en Trancas-Tucumán, las precipitaciones apenas alcanzan los 700-800 mm (Minetti y Vargas, 2005) (Figura 1).

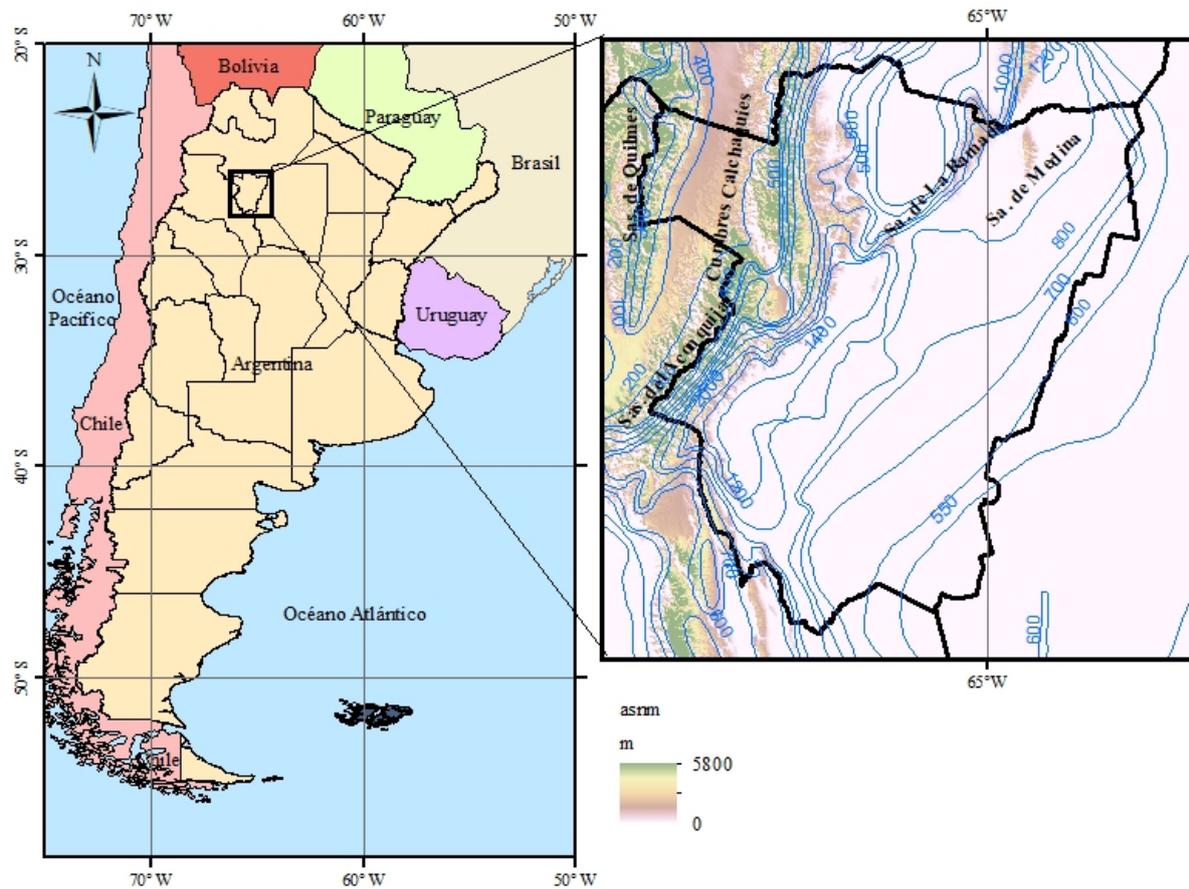


Figura 1: Sistema Experimental: Isoyetas representativas de la Precipitación Media Anual y principales accidentes orográficos.

## 2.2 DATOS UTILIZADOS

Se consideraron aquellas estaciones con registro en el período 1973 a 2015 (Figura 2). Los datos registrados fueron provistos por distintas fuentes constituidas por organismos estatales y entes privados que se indican en cada caso en la Tabla 1 y se describen a continuación:

- Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEAOC): ente autárquico que forma parte del Ministerio de Desarrollo Productivo de la provincia. Centraliza la información pluviométrica de la provincia, tanto mediante su propia red de medición como las aportadas por otras fuentes.
- Dirección de Recursos Hídricos (DRH): organismo provincial descentralizado con dependencia funcional del Ministerio de Desarrollo Productivo. Cuenta con su red de

medición de precipitación.

- Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (SRHN): interviene en la elaboración y ejecución de la política hídrica nacional. Se puede acceder a su base de datos que cuenta con registros provenientes de estaciones propias, así como de otros organismos (<http://www.mininterior.gov.ar/obras-publicas/rh-base.php>).
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA): organismo descentralizado, dependiente del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación.
- Ingenios azucareros: conservan registros de las precipitaciones diarias en forma continua a través del período estudiado, se incluyen los aportados por el Ingenio Concepción.

Los pluviómetros utilizados son manuales y su

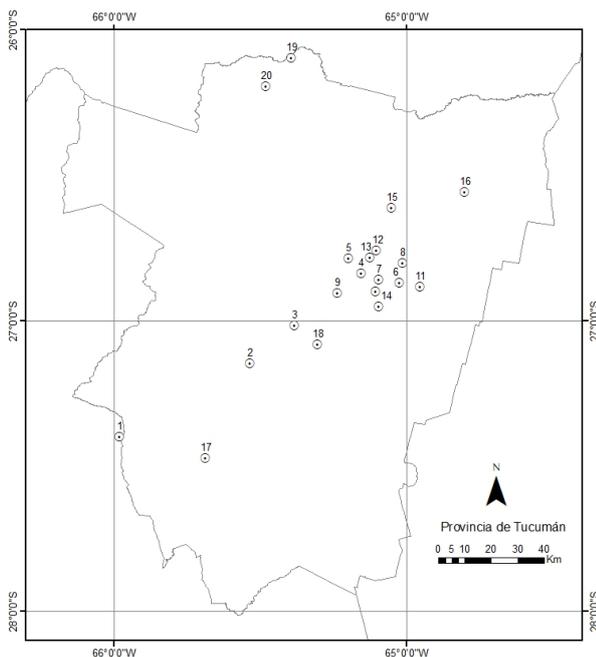


Figura 2: Estaciones pluviométricas con registro en el período 1973 a 2015 en la provincia de Tucumán.

emplazamiento sigue los lineamientos propuestos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para asegurar que cuenten con la exposición necesaria para el correcto registro de la precipitación.

El análisis fue realizado basado en años hidrológicos, que en la provincia de Tucumán comienzan el primero de septiembre y finalizan el 31 de agosto del siguiente año. En lo sucesivo se menciona a cada año hidrológico por el segundo año que lo conforma, a saber, si un año comienza el 1 de septiembre de 1974 y finaliza el 31 de agosto de 1975, se lo denominará 1975.

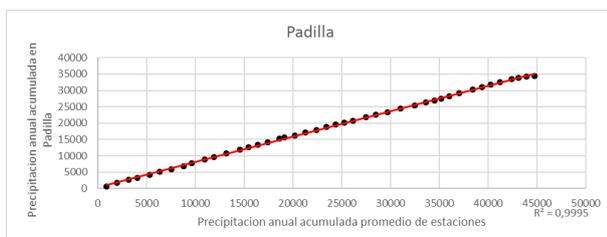


Figura 3: Curva de Doble Masa para verificar cambios en el instrumental.

Para verificar que no haya habido un cambio de posición o de instrumental que genere cambios significativos en los registros se realizaron curvas de doble masa de la precipitación acumulada contrastando el resultado de cada estación con la sumatoria de las estaciones vecinas y verificando el ajuste a una única recta (Aparicio Mijares, 1999). El resultado obtenido para las estaciones escogidas fue bueno, manifestado por un coeficiente  $R^2$  superior 0,98 en todos los casos (Figura 3). Para la determinación de los índices se consideraron sólo aquellos años hidrológicos que no presentaban faltantes en el período noviembre – marzo, donde ocurre entre el 50 y el 80 % de la precipitación. Las series de máximos y totales anuales pasaron exitosamente las pruebas estadísticas de homogeneidad. En cuanto al control de calidad de los datos se verificó que no existan fechas duplicadas o fuera de secuencia en las series diarias. Se hicieron controles de rango fijo, inspeccionando que no existan datos negativos o mayores que el máximo histórico registrado en la región (300 mm en un día). Además, se realizó un control de tipo variable, estableciendo umbrales que definen valores sospechosos para cada mes del año. Para definir estos umbrales se utiliza la siguiente fórmula (González-Rouco et al., 2001, Veiga et al., 2013):

$$P_0 = Perc75 + n.r_i$$

donde *Perc75* es el percentil 75 de los valores diarios de precipitación para todos los registros correspondientes a cada mes,  $r_i$  es el rango intercuartil para el mes calculado como la diferencia entre el percentil 75 y el 25 y  $n$  es un factor que multiplica a  $r_i$ . Se verificó que cada valor que quedara por fuera de este límite corresponda a un día de excesiva precipitación en las estaciones vecinas, de forma de no eliminar los máximos registrados de interés para el presente trabajo. En caso de no existir coherencia se eliminó el valor dudoso de la serie.

En búsqueda de las tendencias debidas a cambios en la frecuencia de eventos extremos, o a una variación en su magnitud, se consideró la precipitación máxima diaria anual (PMD)

N°	Estación	Latitud	Longitud	Inicio	Fin	FUENTE
1	Potrero del Clavillo	-27,401	-65,978	1954	2017	SRHN
2	Los Sosa	-27,147	-65,533	1954	2017	SRHN
3	Padilla	-27,018	-65,379	1968	2014	INTA
4	Ingenio Concepción	-26,839	-65,152	1973	2015	Ingenio Concepción
5	EEAOC	-26,787	-65,196	1911	2017	EEAOC
6	San Luis	-26,872	-65,021	1973	2015	Ingenio Concepción
7	Maravilla	-26,861	-65,091	1973	2015	Ingenio Concepción
8	Lote 9-10	-26,803	-65,010	1973	2014	Ingenio Concepción
9	San Pedro	-26,906	-65,233	1973	2015	Ingenio Concepción
10	General Paz	-26,900	-65,104	1973	2015	Ingenio Concepción
11	Lolita	-26,885	-64,951	1973	2012	Ingenio Concepción
12	La Calera Ingenio	-26,760	-65,101	1973	2012	Ingenio Concepción
13	Piedritas	-26,784	-65,123	1973	2012	Ingenio Concepción
14	San Miguel	-26,952	-65,092	1973	2012	Ingenio Concepción
15	El Sunchal	-26,614	-65,048	1975	2014	DRH
16	Villa Benjamín Araoz	-26,558	-64,799	1977	2015	DRH
17	Santa Ana	-27,473	-65,683	1973	2015	EEAOC
18	Dique San Carlos	-27,083	-65,300	1973	2015	DRH
19	El Brete	-26,097	-65,392	1975	2015	DRH
20	Chulcas	-26,195	-65,478	1975	2010	DRH

Tabla I: Estaciones pluviométricas seleccionadas en la provincia de Tucumán.

para detectar variaciones en la intensidad, y el número de días por año con precipitación mayor al percentil 95 (NP95). La determinación del percentil 95 fue realizada en el período de referencia 1973 a 2015 en cada una de las estaciones, excluyendo los días con precipitación nula. También se analiza la variación en los totales anuales precipitados (PTA).

### 3. ANÁLISIS DE TENDENCIAS

Para detectar tendencias se utilizó la prueba de Mann-Kendall, ampliamente utilizada en series temporales climáticas e hidrológicas (Hamed, 2008). La principal ventaja de la prueba es que al ser no paramétrica 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:

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

donde  $i$  y  $j$  son posiciones secuenciales dentro de la serie de tiempo y se cumple que  $i < j$ .

El signo de  $(x_j - x_i)$  es igual al signo de la diferencia de rango de cada dato. Esto quiere decir que  $S$  depende no del valor de  $x$  sino 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):

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

donde  $n$  es el número de observaciones.

Esta varianza se reduce cuando hay observaciones iguales (o rangos empatados) en las series de datos, siendo:

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

Donde  $m$  es el número de grupos con observaciones equivalentes y  $t$  es el número de datos con igual valor en cada uno de los grupos mencionados.

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:

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

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 autocorrelacionada, la prueba puede presentar errores en dos sentidos: si la serie analizada tiene autocorrelación positiva la varianza del estadístico de la prueba  $S$  es subestimada, aumentando así la probabilidad de detección de tendencia, presentándose el efecto inverso en series con autocorrelación negativa (López et al., 2007).

Hamed y Rao (1998) proponen una prueba de Mann – Kendall modificada para series autocorrelacionadas basada en la corrección de

la varianza de  $S$  en función del número efectivo de observaciones. La varianza modificada es:

$$Var^*(S) = Var(S) \times \left[ 1 + \frac{2T}{n(n-1)(n_2)} \right] \quad (5)$$

$$\text{con } T = \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)\rho_s(i)$$

donde  $n$  es el número total de observaciones y  $\rho_s(i)$  es la autocorrelación en los rangos de las observaciones.

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

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

donde  $i$  y  $j$  son posiciones secuenciales dentro de la serie de tiempo y  $\beta$  representa la mediana de las pendientes existentes entre todos los pares de datos.

Teniendo en cuenta que el incremento en la concentración de gases de efecto invernadero, como el  $\text{CO}_2$  por ejemplo, es prácticamente lineal al menos en las últimas décadas, los posibles efectos sobre variables climáticas debieran corresponder a tendencias lineales en el tiempo. Es por ello, que incorporamos el análisis de tendencias lineales obtenidas mediante mínimos cuadrados ordinarios (MCO), además de caracterizarse por una mayor simplicidad lo que facilita su interpretación.

#### 4. RESULTADOS

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos en el análisis de tendencias en el período 1973 – 2015 según los métodos descriptos. Para los tres índices estudiados, la mayoría de las tendencias calculadas no son significativas estadísticamente y en algunas estaciones presentan valores nulos. En particular para los totales anuales (PTA) se observa que 6 estaciones presentan tendencias significativas, siendo 5 de ellas negativas. En el índice NP95 se tiene un resultado similar, aunque en este caso los 6 resultados significativos son negativos. La correspondencia entre las

tendencias en la PTA y las observadas en NP95, no se manifiesta de igual forma para los valores máximos anuales (PMDA) que solo presenta 1 valor significativo negativo. Por otra parte, el análisis de tendencias en el período 1954 – 2016 sólo fue posible en 3 estaciones donde se cuenta con un registro más extenso (Tabla 3). El resultado obtenido fue opuesto al descrito anteriormente en la PTA, presentándose en la estación Potrero del Clavillo y Quebrada Los Sosa una tendencia significativa positiva y un valor próximo al nulo de carácter no significativo en la EEAOC. En el caso de la PMDA sólo es significativa la tendencia positiva en la estación Quebrada Los Sosa, mientras que las observadas en las series NP95 son siempre no significativas. Adicionalmente, se analiza la serie completa de la EEAOC por ser la única con un registro de 107 años (Tabla 4). El resultado es positivo en todos los casos, siendo significativos tanto los obtenidos en PTA y en NP95, a diferencia de lo observado en el período 1954 – 2016 donde el resultado no es significativo. El resultado descrito anteriormente indica que las tendencias observadas en las series en el período 1973 – 2015 no son representativas del comportamiento a largo plazo en la región, pues representan una merma inmersa en un aumento de mayor escala, evidenciada en las series de mayor longitud de registro (Figura 4).

La distribución espacial de los resultados en el índice PTA para el período 1973 – 2015 (Figura 5c) presenta uniformidad en el territorio siendo la gran mayoría de resultados negativos. Esto contrasta con los valores análogos alcanzados en el período 1954 – 2016 que diagnostican un significativo incremento en los totales precipitados en la zona pedemontana con tendencia prácticamente nula en la llanura, donde solo se observa dicho incremento al analizar la serie completa (Figura 4c). El gráfico correspondiente al índice NP95 presenta una distribución irregular de incrementos y mermas en la provincia, donde preponderan los valores no significativos aún en el período 1954 – 2016 (Figura 5b). De la misma manera que para los acumulados anuales, el aumento en el número de días con precipitaciones muy intensas (mayores

al percentil 95) deviene significativo en la llanura al considerar la extensa serie que inicia en 1911 (Tabla 4). Finalmente, la PMDA presenta alternancia de tendencias incrementales y mermas no significativas en su gran mayoría entre 1973 a 2015 y solo un valor significativo positivo en la estación Quebrada Los Sosa para el período 1954 – 2016, resultado que no se repite en la serie más larga analizada.

## 5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Para el estudio regional de las tendencias en la precipitación en la provincia de Tucumán se consideraron 3 índices (PTA, PMDA, y NP95) a fin de evaluar posibles cambios tanto en los totales anuales como en el comportamiento de las lluvias más intensas. El análisis involucró solo aquellas estaciones con registro en el período 1973 a 2015 de forma de poder realizar una comparación. Esto resultó en una distribución heterogénea de las estaciones con concentración alrededor de la ciudad capital y de la zona de mayor productividad agrícola. Por otra parte, se extendió el análisis al período entre 1954 a 2016 en las 3 estaciones que contaban con la información necesaria. Finalmente, la extensa serie de 107 años de la EEAOC fue considerada a fin de contrastar con los análisis anteriormente mencionados en períodos más breves.

De acuerdo con los resultados presentes en la bibliografía, Tucumán se encuentra en una zona de transición en cuanto a las estimaciones de tendencias a largo plazo. Zhang et al., (2007) observan tendencias positivas en la precipitación acumulada anual para la franja latitudinal correspondiente a Tucumán (20° S a 30°S), tanto en los valores observados como en los provenientes de los distintos modelos climáticos de simulación. Además, el aumento en el número de eventos extremos en la segunda mitad del siglo 20 ha sido demostrado en varias regiones (Trenberth et al., 2011), incluso donde se redujeron los totales anuales. Por su parte, en los resultados obtenidos por Skansi et al. (2013) predominan las tendencias no significativas en la precipitación en la región estudiada, donde se

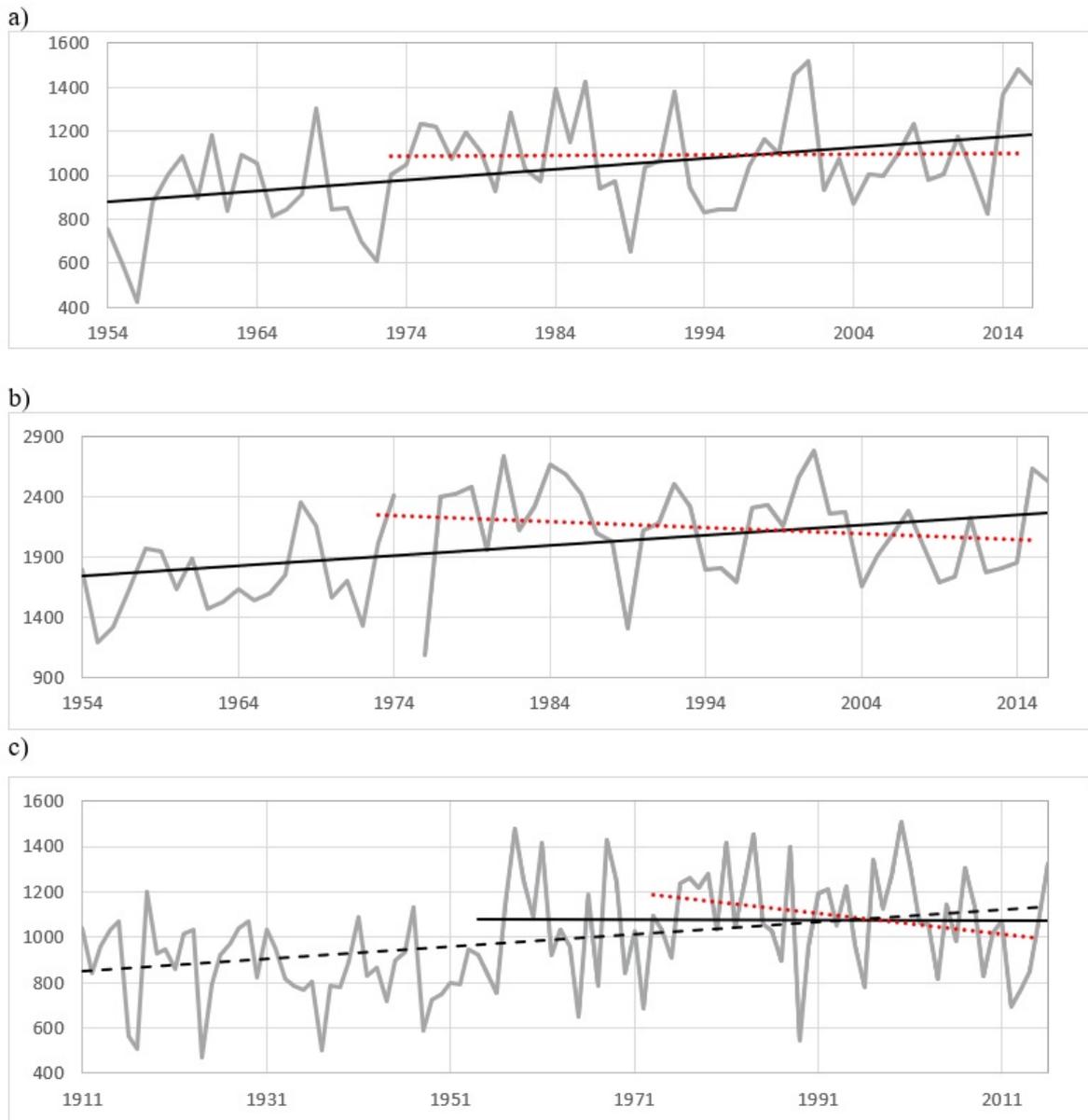


Figura 4: Contraste de tendencias lineales en las series de precipitación total anual en el período 1973 a 2015 (línea roja de puntos) y 1954 a 2016 (línea negra llena) en a) Estación Potrero del Clavillo, b) Estación Quebrada Los Sosa y c) Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes. En la última se agrega a demás la tendencia observada en la serie completa de 1911 a 2016 (línea negra de trazos).

Estación	Total anual				Máximos diarios				Días con precipitación > P95			
	Tendencias		Significancia		Tendencias		Significancia		Tendencias		Significancia	
	MCO	$\beta_{Sen}$	$p_{MK}$	$p_{MK\ mod}$	MCO	$\beta_{Sen}$	$p_{MK}$	$p_{MK\ mod}$	MCO	$B_{Sen}$	$p_{MK}$	$p_{MK\ mod}$
1	-0,025	-1,382	0,862	0,862	-0,520	-0,135	0,477	0,398	0,044	0,000	0,154	0,154
2	-8,719	-11,308	0,217	0,323	-0,139	-0,262	0,653	0,653	-0,031	-0,040	0,169	0,169
3	-3,798	-3,882	0,109	0,109	-0,263	-0,319	0,255	0,205	-0,014	0,000	0,508	0,508
4	-0,630	-0,750	0,745	0,745	-0,505	-0,174	0,544	0,544	-0,006	0,000	1,000	1,000
5	-4,608	-5,100	0,112	0,071	-0,435	-0,213	0,362	0,362	-0,034	-0,043	0,193	0,193
6	-2,486	-3,382	0,169	0,169	-0,129	0,222	0,688	0,688	-0,011	0,000	0,734	0,734
7	0,375	-0,588	0,849	0,819	0,188	0,000	0,973	0,971	0,010	0,000	0,596	0,547
8	-7,579	-8,636	0,019	0,019	-0,564	-0,261	0,224	0,224	-0,041	-0,036	0,049	0,049
9	4,493	5,194	0,145	0,097	0,676	0,560	0,357	0,357	0,004	0,000	0,889	0,907
10	-1,805	-2,000	0,492	0,492	0,335	0,167	0,616	0,616	-0,038	-0,037	0,112	0,112
11	-5,880	-5,889	0,039	0,039	-0,437	-0,400	0,338	0,338	-0,105	-0,107	0,000	0,000
12	-7,321	-7,867	0,022	0,022	-1,433	-0,938	0,015	0,015	-0,079	-0,071	0,003	0,000
13	-5,495	-4,667	0,113	0,113	-0,354	-0,150	0,498	0,242	-0,103	-0,095	0,000	0,000
14	6,564	7,615	0,040	0,040	0,549	0,571	0,230	0,230	-0,019	0,000	0,439	0,439
15	-9,090	-6,900	0,173	0,000	-1,274	-0,500	0,276	0,276	-0,068	-0,048	0,052	0,047
16	-10,552	-15,000	0,011	0,011	-0,091	-0,385	0,817	0,817	-0,080	-0,077	0,004	0,004
17	-6,591	-7,500	0,427	0,427	0,352	0,375	0,342	0,342	-0,036	0,000	0,272	0,496
18	-3,645	-3,967	0,355	0,355	-0,399	-0,448	0,342	0,342	-0,036	0,000	0,248	0,146
19	-0,957	-2,591	0,561	0,561	0,690	0,308	0,495	0,591	0,011	0,000	0,570	0,570
20	-2,394	-1,967	0,314	0,186	0,331	0,333	0,615	0,456	-0,066	-0,056	0,061	0,061

Tabla II: Tendencias calculadas en el período 1973 a 2015 en las series de precipitación total anual, máximos diarios anuales y número de días con precipitación superior al percentil 95 con mínimos cuadrados ordinarios (MCO), la prueba no paramétrica de Sen ( $\beta_{Sen}$ ), la prueba de Mann - Kendall ( $p_{MK}$ ) y la misma modificada ( $p_{MK\ mod}$ ). El sombreado corresponde a las tendencias significativas al 5%.

Estación	Total anual				Máximos diarios				Días con precipitación > P95			
	Tendencias		Significancia		Tendencias		Significancia		Tendencias		Significancia	
	MCO	$\beta_{Sen}$	$p_{MK}$	$p_{MK\ mod}$	MCO	$\beta_{Sen}$	$p_{MK}$	$p_{MK\ mod}$	MCO	$B_{Sen}$	$p_{MK}$	$p_{MK\ mod}$
1	4,975	3,670	0,009	0,031	0,047	0,042	1,000	1,000	0,0275	0,020	0,079	0,110
2	8,567	7,400	0,011	0,049	0,745	0,743	0,010	0,002	0,0180	0,000	0,412	0,368
5	-0,138	-0,517	0,827	0,789	0,000	-0,021	0,841	0,781	-0,0134	0,000	0,462	0,468

Tabla III: Tendencias calculadas en el período 1954 a 2016 en las series de precipitación total anual, máximos diarios anuales y número de días con precipitación superior al percentil 95 con mínimos cuadrados ordinarios (MCO), la prueba no paramétrica de Sen ( $\beta_{Sen}$ ), la prueba de Mann - Kendall ( $p_{MK}$ ) y la misma modificada ( $p_{MK\ mod}$ ). El sombreado corresponde a las tendencias significativas al 5%.

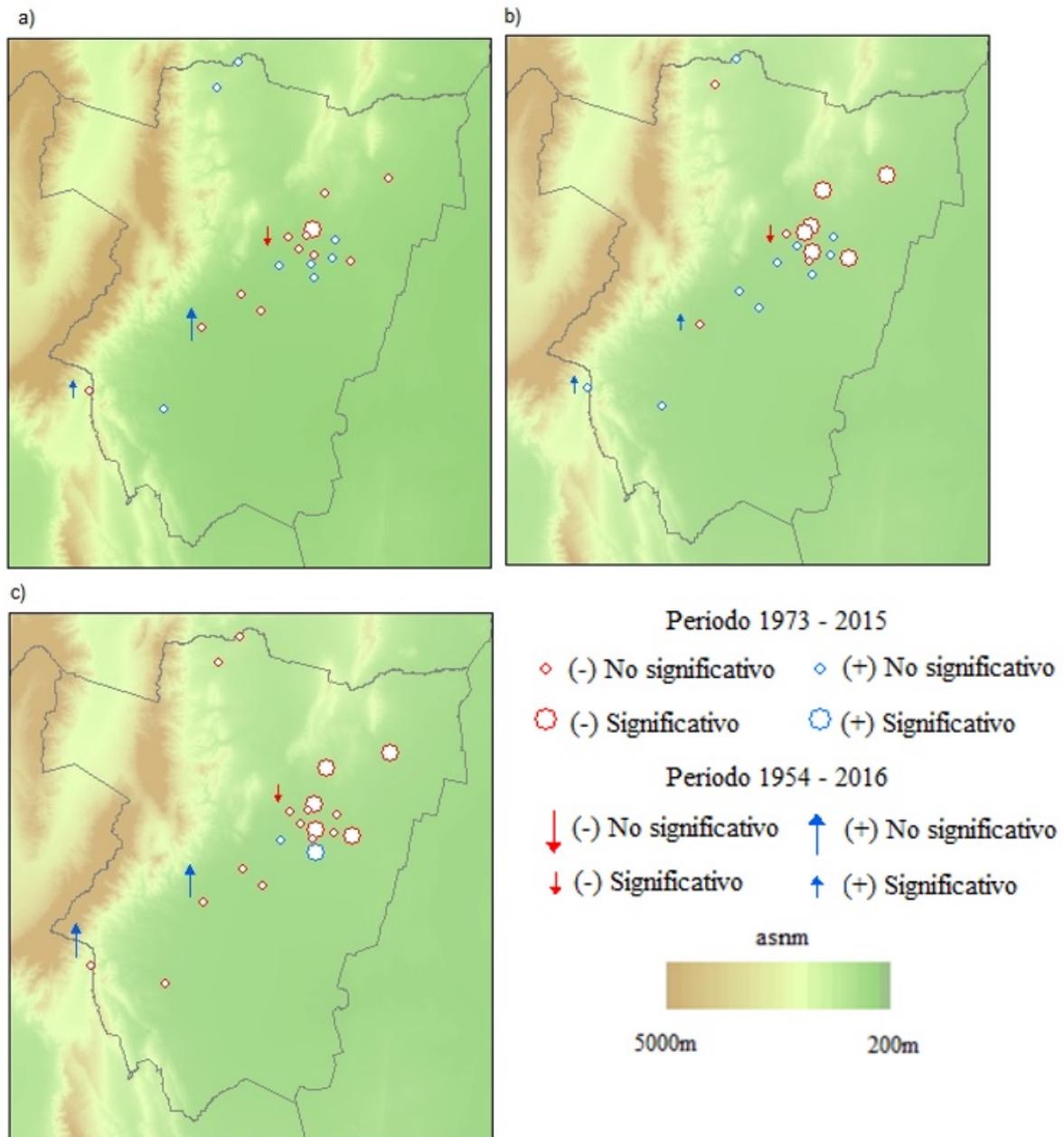


Figura 5: Distribución de las tendencias obtenidas mediante la prueba Sen en los índices de precipitación: (a) máxima precipitación diaria anual. (b) número de días con precipitación superior al percentil 95 y (c) precipitación total anual.

Estación	Total anual				Máximos diarios				Días con precipitación >P95			
	Tendencias		Significancia		Tendencias		Significancia		Tendencias		Significancia	
	MCO	$\beta_{Sen}$	$p_{MK}$	$p_{MK\ mod}$	MCO	$\beta_{Sen}$	$p_{MK}$	$p_{MK\ mod}$	MCO	$B_{Sen}$	$p_{MK}$	$p_{MK\ mod}$
5	2,290	2,606	0,002	0,002	0,08	0,084	0,480	0,480	0,019	0,015	0,049	0,047

Tabla IV: Tendencias calculadas en el período 1911 a 2016 en las series de precipitación total anual, máximos diarios anuales y número de días con precipitación superior al percentil 95 con mínimos cuadrados ordinarios (MCO), la prueba no paramétrica de Sen ( $\beta_{Sen}$ ), la prueba de Mann – Kendall ( $p_{MK}$ ) y la misma modificada ( $p_{MK\ mod}$ ). El sombreado corresponde a las tendencias significativas al 5%.

alternan resultados positivos y negativos.

Las tendencias positivas pronosticadas en los trabajos mencionados, tanto en los totales anuales como el número de episodios intensos, concuerdan con los resultados obtenidos en varias de las estaciones analizadas en el período 1954 a 2016 y en el más extenso que abarca más de 100 años. Esta situación fue disímil para el lapso más breve, donde los resultados fueron dispares y evidenciaron un decrecimiento significativo en gran parte de las series estudiadas. En aquellas donde se disponía de mayor información, se verificó que se trataba de período parcial de decrecimiento en una serie con tendencia general positiva de largo plazo, como puede verse en la Figura 4. La tendencia negativa observada a partir de 1970 podría deberse al efecto de forzantes naturales, que compensarían los efectos del cambio climático mediante variaciones en las fluctuaciones climáticas. Sería conveniente entonces, en trabajos futuros, analizar los posibles forzantes de la precipitación (naturales y antropogénicos) en nuestra región, y la interacción entre ellos para poder determinar claramente sus roles y efectos.

La escasez de series históricas de precipitación y su distribución irregular dificultan arribar a conclusiones definitivas a cerca de las tendencias a largo plazo en la precipitación extrema. Más aún si se tiene en cuenta que al ser los eventos extremos poco frecuentes, serán pocos los datos disponibles para asegurar su alteración en 30 años de registro. La verosimilitud de las conclusiones derivadas de los análisis de datos depende de

la calidad y cantidad de datos, así como del análisis realizado, con lo que mientras más extraordinario sea el evento más difícil será asegurar la presencia de tendencias a largo plazo. Se destaca la importancia de continuar investigando las tendencias en la precipitación con series largas y completas, dado que los resultados de las pruebas estadísticas realizadas colaborarían en la formulación de medidas de adaptación a través de la generación de estrategias apropiadas tanto en el manejo de excedentes hídricos como en la regulación de los recursos hídricos.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, a la Dirección de Recursos Hídricos de la provincia de Tucumán y a la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación por los datos aportados para este trabajo y al proyecto PIP 294 – CONICET dirigido por Gustavo A. Mansilla por su colaboración. Este trabajo ha sido financiado por el proyecto: PIUNT E541 y PICT 2011-1008.

#### REFERENCIAS

- Aparicio Mijares, F. J., 1999: Fundamentos de Hidrología de Superficie. 1a. Ed.). México: Limusa.
- Boers, N., Barbosa, H.M.J., Bookhagen, B., Marengo, J.A., Marwan, N. y Kurths, N., 2015: Propagation of Strong Rainfall Events from Southeastern South America to the Central Andes. *Journal of Climate*, 28, 7641-7658.

- Castañeda, M. E., 1995: La influencia de algunos aspectos de la circulación sobre Argentina, en la climatología de la precipitación (tesis doctoral). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Doyle, M y Barros, V., 2000: Relación entre la precipitación estival y patrones de circulación. CD- ROM of the XI Brazilian Congress of Meteorology. Rio de Janeiro, Brazil. Brazilian Meteorological Soc., 5 pp.
- Fu, G., Yu, J., Yu, X., Ouyang, R., Zhang, Y., Wang, P., Liu, W. y Min, L., 2013: Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961–2009. *Journal of Hydrology*, 487, 48–59.
- González-Rouco, J.F., Jiménez, J.L., Quesada, V. y Valero, F., 2001: Quality Control and Homogeneity of Precipitation Data in the Southwest of Europe. *Journal of Climate*, 14(5): 964-978.
- 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., Peterson, T.C., Alves, L.M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y.M.T., Baez, J., Barros, V.R., et al., 2006: Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature, *Journal of Climate*, 19, 1490-1512.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 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 and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (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.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (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 and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Kendall, M.G., 1975: Rank Correlation Methods. Griffin, London, UK.
- López, P. M.; Seoane, R. S.; Fornero, L. A.; Rodríguez, J. L. y Nuñez M. S., 2007: Análisis de Tendencia en Series Autocorrelacionadas. XXI Congreso Nacional del Agua. Tucumán, Argentina. Marengo, J.A., Liebmann, B., Grimm, A.M., Misra, V., Silva Dias, P.L., Cavalcanti, I.F.A., Carvalho, L.M.V., Berbery, E.H., Ambrizzi, T., Vera, C.S., Saulo, A.C., Nogues-Paegle, J., Zipser, E., Seth, A. y Alves, L.M., 2012: Recent developments on the South American monsoon system. *Int. J. Climatol.*, 32, 1–21. doi:10.1002/joc.2254
- Medina, E. R. y Minetti, J. L., 2004: El salto climático y su impacto en la frecuencia de precipitaciones máximas diarias en San Miguel de Tucumán. X Reunión y LV Latinoamericana de Agrometeorología. Mar del Plata, Argentina.
- Minetti, J.L., Vargas, W.M., Poblete, A.G., Acuña, L.R., Casagrande, G., 2003: Non-linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999, *Atmósfera*, 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.
- Nicolini, M., C. Saulo, J. C. Torres, and P. Salio, 2002: Enhanced precipitation over southeastern South America related to low-level jet events during austral warm season. *Meteorologica*, 27, 59–70.
- Prohaska, F., 1976: The Climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. In Schwerdtfeger, W. (ed.), *Climates of Central and South America*. World Survey of Climatology, Elsevier, Amsterdam, 13-73.
- 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., 2012: 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, 109-230.
- Skansi, M., Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E., Arevalo Groening, J., Bentancur, O., Castellón Geier, Y., Correa Amaya, R., Jácome, H., Malheiros Ramos, A., Rojas C., Max Pasten, A., Sallons Mitro, S., Villaroel Jiménez C., Martínez, R., Alexander, L. y Jones P. 2013: Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change* 100 (2013) 295–307.
- Trenberth, K.E., 2011: Changes in precipitation with climate change, *Clim. Res.*, 47, 123–138, doi: 10.3354/cr00953.
- Veiga, H., Herrera, N., Skansi, M. y Podestá, G., 2013: Descripción de controles de calidad de datos climáticos diarios implementados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur. Serie de Reportes Técnicos – Reporte Técnico CRC – SAS 2014 – 002.
- Zhang, X., Zwiers, F.W., Hegerl, G.C., Lambert, H., Gillett, N.P., Solomon, S., Stott, P.A. y Nozawa, T., 2007: Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature* 448, doi:10.1038/nature06025, 2007.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.