

Distribución espacial de tendencias en la precipitación extrema en Tucumán

Flavia M. Bazzano^{1,2}, *Teresita Heredia*³ 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: A partir de los registros diarios de lluvias registrados en 32 estaciones ubicadas en la región comprendida entre las latitudes 26,1°S y 27,8°S y longitudes 64,8°O y 66,0°O, abarcando el período 1954-2015, se analizaron las tendencias en la precipitación extrema y el patrón espacial de las mismas. El calentamiento global induciría un aumento en la humedad del aire y en la intensidad de las precipitaciones en algunas regiones del planeta. A su vez algunas simulaciones y evidencias empíricas predicen que climas más cálidos debido al aumento del vapor de agua resultarían en eventos de precipitación más intensos. La distribución espacial de las tendencias obtenidas en nuestro caso, con valores negativos y positivos, estaría parcialmente de acuerdo con la ubicación de Tucumán, que se encuentra en una región geográfica intermedia entre tropical y subtropical.

INTRODUCCION

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 periodo extendido, se trate de décadas o un periodo aún mayor. Puede deberse a procesos naturales o bien a forzantes externos, como los efectos antropogénicos que modifican la composición natural de la atmósfera. Se proyecta que los cambios percibidos en la actualidad persistirán al menos durante este siglo, considerando cierto 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). A diferencia de dicha variable, las anomalías en la precipitación no se dan de manera uniforme en el planeta (Trenberth, 2011, IPCC, 2014) y presentan singular importancia en tanto involucran materias tan diversas como son la generación de energía, prevención de inundaciones, obras de regulación de caudales, planes de emergencia temprana, entre otros.

Un clima cambiante implica modificaciones en la frecuencia, intensidad, extensión espacial, duración y momento de ocurrencia de eventos extremos que pueden estar ligados a cambios en la media, varianza o en la forma de la distribución de probabilidad, o a todos ellos conjuntamente. Las tendencias a largo plazo de extremos climáticos presentan una gran variabilidad geográfica, siendo esto más notable en las precipitaciones intensas (Seneviratne et al., 2012). Recientemente, se han profundizado los estudios de tendencias en tormentas extremas dado que sus consecuencias suelen ser severas y traen aparejados daños y altos costos asociados a reparaciones y previsión (Easterling et al., 2000). Cabe destacar que la magnitud de las catástrofes ocasionadas por eventos climáticos extremos tiene una dimensión social y física, lo que implica que cambios en la frecuencia y magnitud de los eventos afectan al riesgo de desastre, pero también lo hacen la diversidad espacial y los patrones dinámicos de exposición y vulnerabilidad de las poblaciones y ecosistemas (IPCC, 2012).

Los análisis estadísticos presentan tendencias significativas en la ocurrencia de precipitaciones intensas en ciertas regiones del planeta. De hecho, pareciera que existe una mayor tendencia a incrementarse que a disminuir, aunque los resultados varían según la región. Haylock et al. (2006), en un extenso análisis de precipitación media y extrema de estaciones de América del Sur, mostró que, para el Norte y Centro de Argentina tanto la precipitación media como la extrema presentan una tendencia a aumentar. 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, 2003). Por su parte, los eventos extremos han sido estudiados en tanto las inundaciones son recurrentes en la región y los parámetros de diseño con que se dimensionan 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, 2010).

A partir de los registros diarios de lluvias registrados en 32 estaciones ubicadas en la provincia de Tucumán, abarcando el período 1954-2015, se analizan en el presente trabajo las tendencias en la precipitación extrema y el patrón espacial de las mismas. La comprensión de distribución espacial de las tendencias a largo plazo en la región, se torna esencial para el desarrollo de estrategias para la adaptación y mitigación de los impactos del calentamiento global.

ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Sistema Experimental

El régimen de precipitación dominante en Tucumán es subtropical (Prohaska, 1976), con una alta concentración estival de la precipitación, ocurriendo en el período noviembre - 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 (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, 2005).

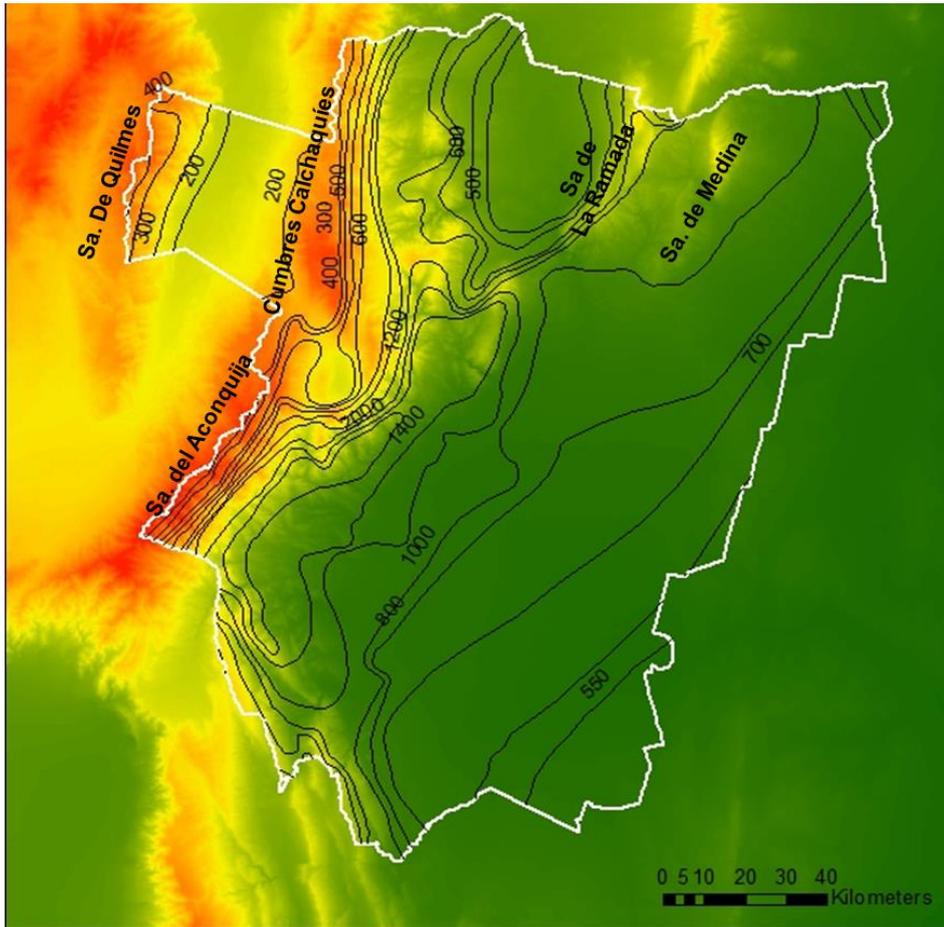


Figura 1.- Sistema Experimental: Isolíneas de Precipitación Media Anual y principales accidentes orográficos.

La gran variabilidad climática que posee la provincia de Tucumán, producto de la influencia de los cordones montañosos que la atraviesan, genera la convivencia de múltiples regímenes de precipitación en una superficie que apenas supera los 20000 km². 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 pedemontana, 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 1500msnm, al encontrarse los vientos húmedos con una sierra de ladera simple de gran altura como es la Sierra del Aconquija donde se superan los 2000mm 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 1000m snm promedio, no alcanzan a producir un máximo importante de precipitación que apenas supera los 900mm sobre la sierra de La Ramada y los 800mm en la sierra de Medina. Posteriormente sobre la ladera de las Cumbres Calchaquies en Trancas-Tucumán, las precipitaciones apenas alcanzan los 700-800mm (Minetti y Vargas, 2005) (Figura 1).

Series de Precipitación

Se consideraron aquellas series que superaban los 30 años hidrológicos de registros. Los datos registrados fueron provistos por distintas fuentes constituidas por organismos estatales y entes privados:

- 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.
- Secretaría 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.

Las estaciones pluviométricas utilizadas son manuales y registran la lámina precipitada con un pluviómetro tipo B del Servicio Meteorológico Nacional. 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 2). 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.

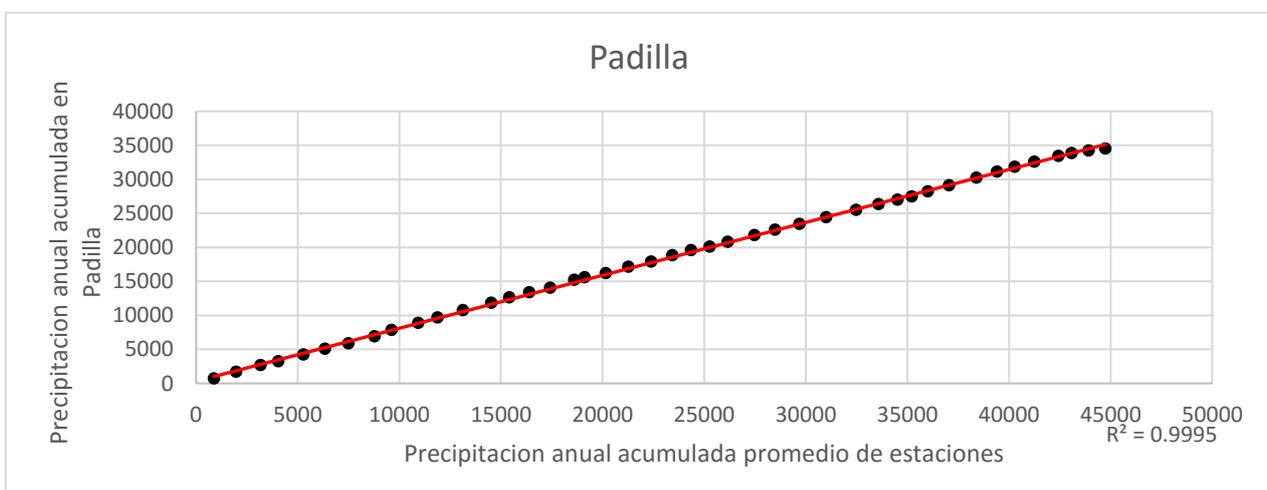


Figura 2.- Curva de Doble Masa para verificar cambios en el instrumental

Tabla 1.- Estaciones pluviométricas con longitud de serie mayor a 30 años en la provincia de Tucumán.

Nº	Estación	Long. de serie	Latitud	Longitud	Inicio	Fin	FUENTE
1	Potrero del Clavillo	62	-27,401	-65,978	1954	2015	SRHN
2	Los Sosa	62	-27,147	-65,533	1954	2015	SRHN
3	Padilla	47	-27,018	-65,379	1968	2014	INTA
4	Ingenio Concepción	43	-26,839	-65,152	1973	2015	Ingenio Concepción
5	San Miguel de Tucumán	43	-26,787	-65,196	1973	2015	EEOAC
6	San Luis	43	-26,872	-65,021	1973	2015	Ingenio Concepción
7	Maravilla	43	-26,861	-65,091	1973	2015	Ingenio Concepción
8	Lote 9-10	42	-26,803	-65,010	1973	2014	Ingenio Concepción
9	San Pedro	41	-26,906	-65,233	1973	2015	Ingenio Concepción
10	General Paz	41	-26,900	-65,104	1973	2015	Ingenio Concepción
11	Lolita	40	-26,885	-64,951	1973	2012	Ingenio Concepción
12	La Calera Ingenio	40	-26,760	-65,101	1973	2012	Ingenio Concepción
13	Piedritas	40	-26,784	-65,123	1973	2012	Ingenio Concepción
14	Alabama	34	-26,811	-64,985	1972	2005	Ingenio Concepción
15	Lote 1-2	33	-26,802	-65,108	1973	2012	Ingenio Concepción
16	Lote 5-8	33	-26,813	-65,040	1973	2005	Ingenio Concepción
17	San Miguel	31	-26,952	-65,092	1973	2012	Ingenio Concepción
18	Ralos Mayo	39	-26,897	-65,002	1975	2015	DRH
19	Colombres Campo de Riego	36	-26,882	-65,110	1975	2011	DRH
20	El Sunchal	36	-26,614	-65,048	1975	2014	DRH
21	Villa Benjamín Araoz	35	-26,558	-64,799	1977	2015	DRH
22	Dique La Aguadita	35	-26,750	-65,154	1975	2014	DRH
23	Tala Pozo	34	-26,673	-64,774	1977	2015	DRH
24	Santa Ana	34	-27,473	-65,683	1973	2015	EEOAC
25	Dique San Carlos	34	-27,083	-65,300	1973	2015	DRH
26	La Tala	34	-26,993	-65,058	1974	2015	DRH
27	El Brete	34	-26,097	-65,392	1975	2015	DRH
28	Chulcas	32	-26,195	-65,478	1975	2010	DRH
29	La Cocha	31	-27,772	-65,606	1976	2014	DRH
30	Villa de Trancas	31	-26,232	-65,277	1982	2014	DRH
31	Dique Tacanas	30	-26,277	-65,523	1975	2013	DRH
32	Potrero de las Tablas	49	-26,858	-65,426	1966	2015	SRHN

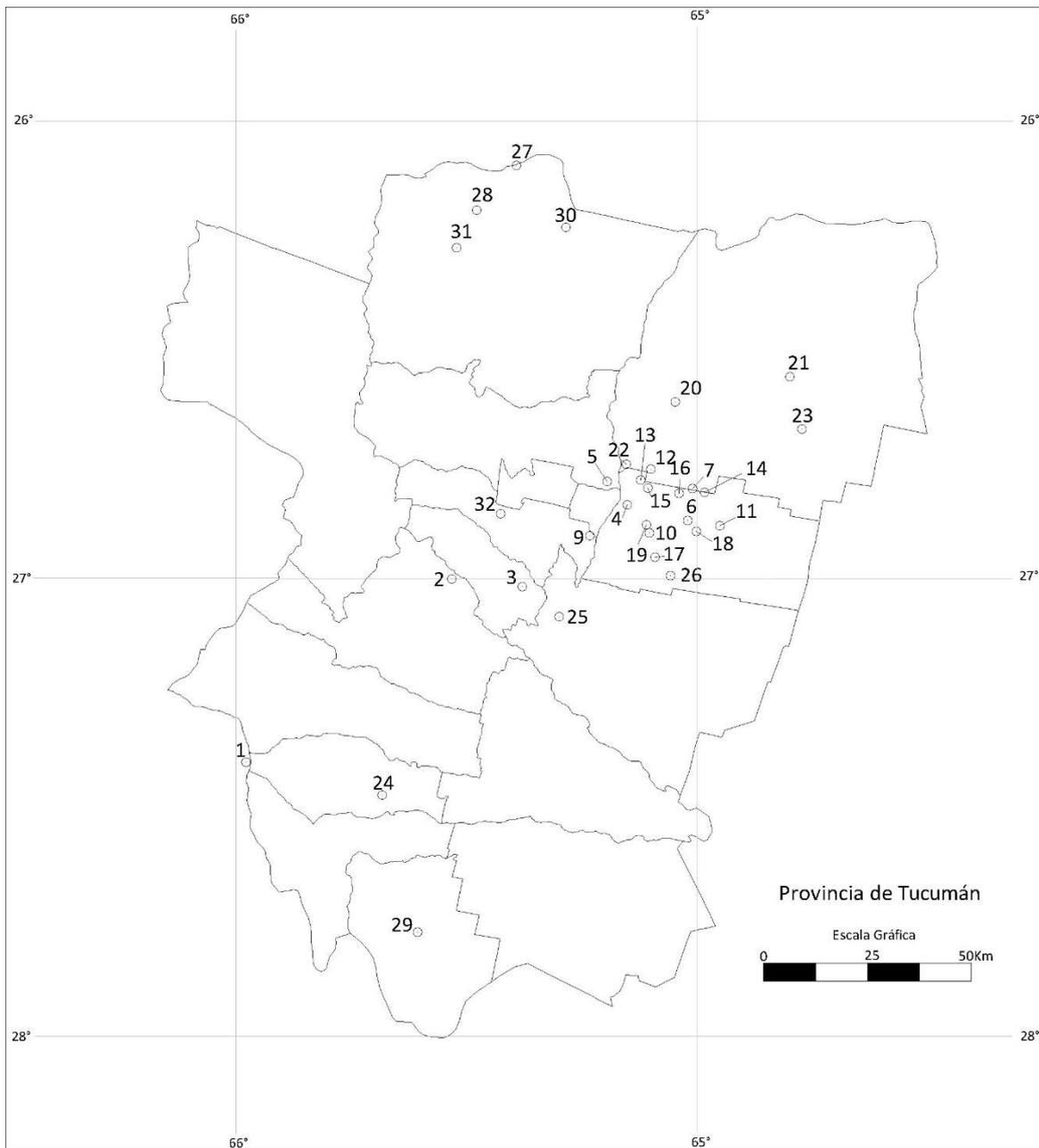


Figura 3.- Estaciones pluviométricas con más de 30 años de registro en la provincia de Tucumán. En búsqueda de las tendencias debidas a cambios en la frecuencia de eventos extremos, o a una variación en su magnitud, se considerará la precipitación máxima diaria anual (PMD) para detectar variaciones en la intensidad, y el número de días por año con precipitación mayor al percentil 95 (NP95). También se analiza la variación en los totales anuales precipitados (PTA).

Forzantes antropogénicos de las tendencias a largo plazo

Ante la evidencia de las variaciones que sufren ciertos extremos climáticos, se estudia la posible influencia antropogénica, como el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Numerosos estudios concluyen a cerca de dicho causante en vista que, al menos en las últimas décadas, la tendencia de la concentración del CO₂ en la atmósfera es creciente de forma cuasi lineal (IPCC, 2007; Trenberth, 2011; Fu et al., 2013) (Figura 4).

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 a reportes del IPCC, durante el siglo 20 el vapor de agua atmosférico aumentó alrededor de un 5% en la atmósfera sobre los océanos. Como la precipitación se debe principalmente a sistemas climáticos alimentados por vapor de agua almacenado en la atmósfera, el efecto final esperado sería un aumento en la intensidad de las precipitaciones, con riesgo de lluvias intensas. Es así como, la teoría básica, los modelos climáticos y la evidencia empírica predicen que climas más cálidos resultaran en precipitaciones más intensas aun cuando la precipitación total anual se haya reducido (IPCC, 2007).

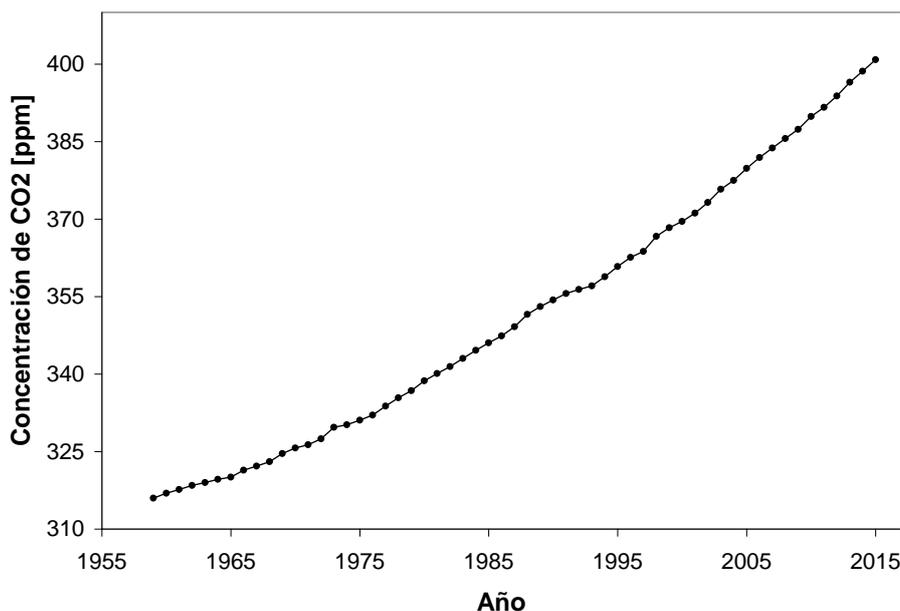


Figura 4.- Concentración media anual de CO₂ medido en Mauna Loa. Datos obtenidos del Earth System Research Laboratory (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>) para el período 1959-2015.

Algunos patrones a gran escala de las tendencias en la precipitación media global son evidentes, junto a los incrementos en los valores medios se espera una redistribución latitudinal de la variable, con incrementos en las latitudes más altas, decrecimientos en los subtrópicos 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 Argentina, mientras que los resultados son opuestos en el

Mediterráneo, sudeste de Asia y África (Trenberth, 2011). La situación geográfica de Tucumán es intermedia, entre una zona tropical y subtropical, y se espera una tendencia creciente.

ANALISIS 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:

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

El signo de $(x_j - x_i)$ para $i < j$ 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):

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

donde n es el número de observaciones.

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

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

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 serialmente correlacionada, 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:

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

donde 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 β representa la mediana de las pendientes existentes entre todos los pares de datos. En la Figura 5 se presenta la distribución de las tendencias obtenidas para cada índice analizado.

Teniendo en cuenta que el incremento en la concentración de gases de efecto invernadero, como el CO₂ por ejemplo, es prácticamente lineal (ver Figura 4) 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.

Tabla 2.- Tendencias 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 (β_{Sen}), la prueba de Mann – Kendall (ρ_{MK}) y la misma modificada ($\rho_{MK\ mod}$). El sombreado corresponde a las tendencias significativas al 5%.

N	Total anual				Máximos diarios				Días con precipitación>P95		
	MCO	β_{Sen}	ρ_{MK}	$\rho_{MK\ mod}$	MCO	β_{Sen}	ρ_{MK}	$\rho_{MK\ mod}$	MCO	β_{Sen}	$\rho_{MK\ mod}$
1	3,51	3,19	0,01	0,01	0,11	0,00	0,50	0,50	0,07	0,06	0,04
2	5,50	5,33	0,02	0,02	0,76	0,67	0,01	0,00	0,07	0,07	0,01
3	0,24	-0,68	0,41	0,41	-0,01	-0,11	0,32	0,27	-0,01	0,24	0,00
4	0,51	0,18	0,46	0,45	-0,51	-0,26	0,27	0,27	0,00	0,31	0,00
5	-2,53	-3,17	0,12	0,12	-0,43	-0,32	0,18	0,18	-0,02	0,29	0,00
6	-1,61	-2,10	0,26	0,26	-0,27	0,19	0,34	0,34	-0,03	0,30	0,00
7	1,45	1,17	0,39	0,39	0,19	0,00	0,49	0,49	0,00	0,33	0,00
8	-5,71	-6,00	0,03	0,01	-0,79	-0,26	0,11	0,11	-0,06	0,29	0,00
9	7,71	6,76	0,02	0,02	0,64	0,45	0,18	0,18	0,09	0,38	0,00
10	-0,81	-0,42	0,43	0,43	0,31	0,14	0,31	0,30	-0,08	0,31	0,00
11	-4,01	-5,20	0,07	0,01	-0,44	-0,42	0,17	0,22	-0,08	0,27	0,00
12	-4,85	-5,84	0,06	0,00	-1,43	-1,00	0,01	0,03	-0,12	0,23	0,00
13	-2,49	-2,69	0,21	0,21	-0,35	-0,28	0,25	0,25	-0,05	0,25	0,00
14	-1,82	-2,53	0,26	0,26	-0,54	-0,41	0,10	0,01	-0,02	0,00	0,05
15	-1,91	-2,83	0,25	0,25	-1,11	-0,45	0,18	0,18	-0,01	0,27	0,00
16	-4,29	-3,37	0,10	0,10	-1,13	-1,07	0,02	0,02	-0,12	0,00	0,15
17	5,37	6,75	0,03	0,03	0,55	0,56	0,12	0,12	0,19	0,38	0,00
18	-6,09	-5,92	0,04	0,039	-0,02	-0,29	0,22	0,22	0,04	0,40	0,00
19	-8,76	-10,39	0,00	0,00	1,40	0,75	0,05	0,03	-0,25	0,26	0,00
20	-9,88	-6,27	0,06	0,06	-1,27	-0,38	0,14	0,19	-0,20	0,32	0,00
21	-10,63	-10,64	0,01	0,00	-0,38	-0,13	0,41	0,41	-0,38	0,10	0,01
22	-4,92	-7,98	0,03	0,00	-0,18	0,00	0,49	0,49	-0,39	0,24	0,00
23	-26,11	-29,31	0,00	0,00	-0,01	0,33	0,33	0,33	-0,54	0,00	0,05
24	-10,53	-9,04	0,06	0,04	0,34	0,29	0,17	0,07	-0,37	0,00	0,00
25	-5,65	-4,31	0,04	0,04	-0,48	-0,38	0,17	0,17	-0,28	0,17	0,00
26	-2,95	-2,86	0,22	0,22	0,73	0,59	0,07	0,01	-0,20	0,30	0,00
27	-4,04	-4,31	0,10	0,10	0,86	0,24	0,25	0,25	-0,22	0,29	0,00
28	-5,96	-4,85	0,01	0,03	0,33	0,22	0,31	0,31	-0,27	0,25	0,00
29	-17,71	-17,21	0,00	0,00	-0,99	-0,56	0,20	0,20	-0,67	0,08	0,01
30	-1,44	-3,36	0,29	0,19	-1,07	-0,47	0,09	0,09	-0,26	0,20	0,00
31	-4,57	-4,20	0,05	0,05	-0,54	-0,38	0,12	0,12	-0,33	0,20	0,00
32	-9,37	-3,00	0,10	0,10	-0,57	-0,54	0,02	0,00	-0,54	-0,25	0,00

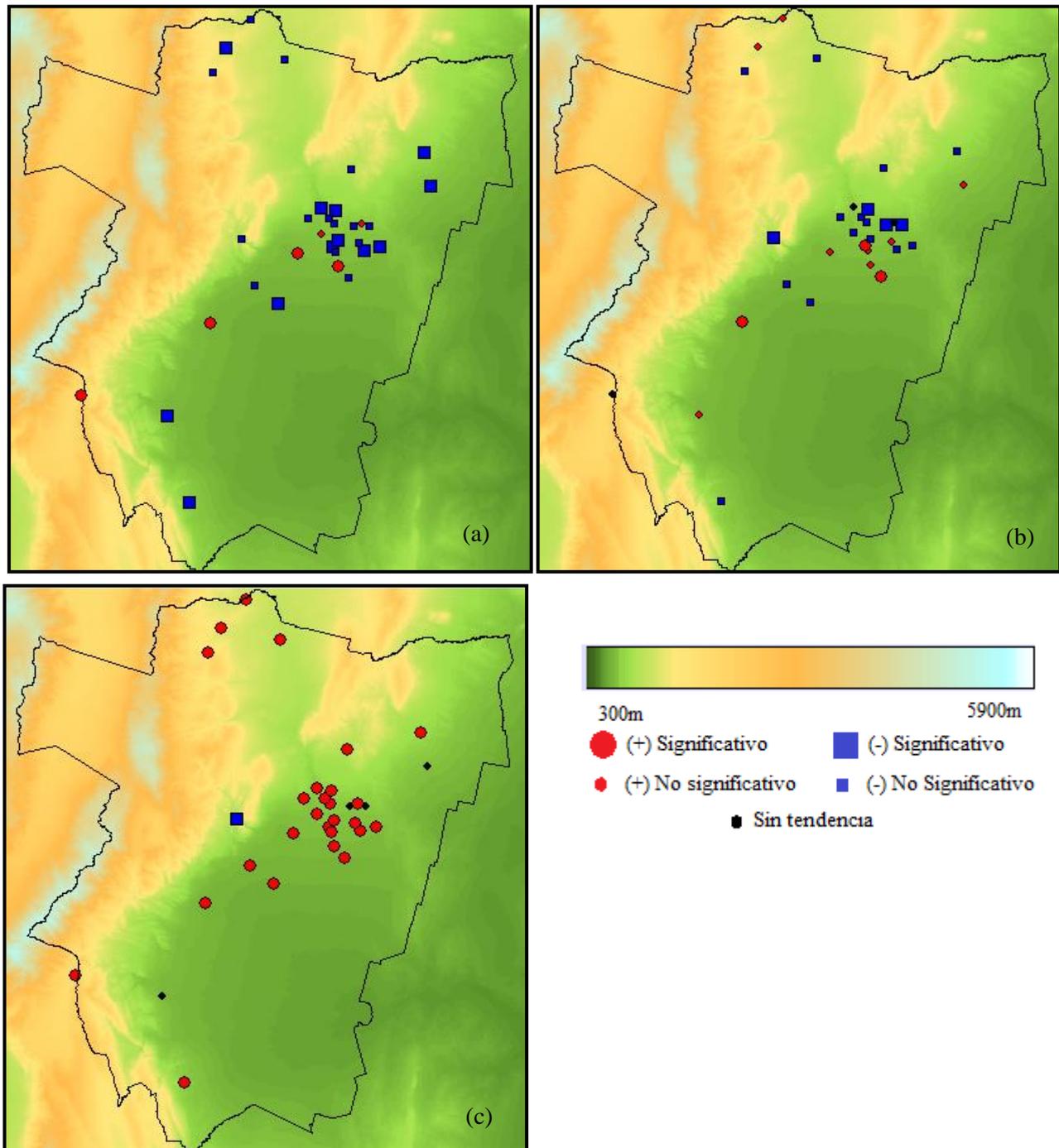


Figura 5.-Distribución de las tendencias obtenidas mediante la prueba Sen en los índices de precipitación: (a) precipitación total anual. (b) máxima precipitación diaria anual y (c) número de días con precipitación superior al percentil 95.

DISCUSION Y CONCLUSIONES

Para el estudio regional de las tendencias en precipitación en la provincia de Tucumán se consideraron solo aquellas estaciones que superaban los 30 años de registro. Esto resulto en una distribución heterogénea de las estaciones que presentan concentración alrededor de la ciudad capital y de la zona de mayor productividad agrícola.

Se analizaron las tendencias presentes en la precipitación total anual, la precipitación máxima diaria y el número de días con precipitación mayor al percentil 95, evidenciando diferencias entre ellos.

En los totales anuales se observa que, si bien hay un mayor número de estaciones con tendencias significativas negativas, algunas de ellas presentan el resultado opuesto y la distribución no presenta una forma regular. Por su parte, los máximos diarios anuales presentan aún mayor paridad en el resultado, con lo cual no se puede concluir que alguna predomine. Además, se observa en ambos casos que la mayoría de las tendencias no son significativas estadísticamente y presenta valor nulo en algunas estaciones. Finalmente, las tendencias positivas significativas prevalecen en el número de días con precipitación mayor al percentil 95 en toda la región, lo cual indica un notable aumento en la frecuencia de ocurrencia de eventos extremos.

De acuerdo a los resultados presentes en la bibliografía, Tucumán se encuentra en una zona de transición en cuanto a las estimaciones de tendencias a largo plazo. Según algunos modelos (Zhang et al., 2007), la tendencia en precipitaciones extremas (y totales) como resultado del efecto invernadero, debiera ser positivo. 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. Esto concuerda parcialmente con los resultados obtenidos, sin embargo, es notable la presencia de tendencias significativas negativas tanto en los totales anuales como en los máximos diarios anuales, lo que podría deberse a que existen forzantes naturales como el fenómeno El Niño-Oscilación Sur que podría compensar los efectos del cambio climático mediante variaciones en las fluctuaciones climáticas periódicas. Lo antedicho no implica la ausencia de tendencias si no que el conjunto de forzantes climáticos podría anularse entre sí, con lo que sería conveniente en trabajos futuros analizar los forzantes naturales y la interacción entre ellos y los antropogénicos. Además, el período de registro no coincide en todas las estaciones, con lo que podría manifestarse una disminución inmersa en un aumento de mayor escala si se contara con un registro temporal más amplio en vista que las tendencias en general no son lineales, y pueden presentar períodos con distinto comportamiento.

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 más 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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.
- Easterling, D.R., Evans, J.L., Ya Groisman, P., Karl, T.R., Kunkel, K.E. y Ambenje, P. (2000) Observed Variability and Trends in Extreme Climate Events: A Brief Review. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81, 417-425.
- 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.
- 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.
- 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 and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 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. 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., Noguez-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
- 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, *Atmosfera*, 16, 119-135.
- Minetti, J. L.; 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
- Paz, R. y Bazzano, F.M. (2010) *Dinamica de Tormentas Extremas*, EAE Editorial Academia Espanola, Germany.
- 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.
- Trenberth, K.E. (2011) Changes in precipitation with climate change, *Clim. Res.*, 47, 123–138, doi: 10.3354/cr00953.
- Zhang, X., F.W. Zwiers, G.C. Hegerl, H. Lambert, N.P. Gillett, S. Solomon, P.A. Stott y T. Nozawa, Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature* 448, doi:10.1038/nature06025, 2007.