

¿Cómo ha cambiado la precipitación en la provincia de Santa Fe?

LOVINO, M.A.¹; MÜLLER, G.V.^{1,2}; SGROI, L.C.¹

RESUMEN

La provincia de Santa Fe concentra un gran porcentaje de la producción agroindustrial de Argentina. En los últimos años, los eventos extremos relacionados con excesos y déficits de precipitación han provocado anegamientos prolongados y severas sequías impactando gravemente la estructura agroindustrial en la provincia. Estos eventos pueden estar influenciados por cambios en la precipitación que se produjeron a partir de mediados del siglo xx. Este trabajo investiga la variabilidad y los cambios en la precipitación y sus extremos en las distintas regiones de la provincia de Santa Fe. Para ello se utilizaron datos observados con registros prolongados y calidad controlada. Se aplicó un Análisis Espectral Singular para examinar la variabilidad temporal de la precipitación anual y los eventos extremos. Los eventos extremos se analizaron a través de los valores máximos anuales de precipitación diaria y de precipitación acumulada en 5 días consecutivos, el índice simple de intensidad diaria y los días secos consecutivos. Los resultados muestran un incremento de la precipitación anual a partir de la década de 1960 y un aumento considerable de la frecuencia y magnitud de los eventos de lluvias intensas en toda la provincia. Además, la precipitación está influenciada por el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) con frecuencias de entre 2 y 6 años. En las estaciones estudiadas de las regiones norte y centro, la precipitación anual aumentó un 15% desde la década de 1960 en comparación con la primera mitad del siglo xx, aunque las tendencias crecientes parecen haberse estabilizado a partir de 1990. En contraposición, los días secos consecutivos han aumentado de manera significativa en las últimas décadas. En las estaciones analizadas de las regiones centro-sur y sur se dio un incremento de la precipitación anual y las lluvias intensas con tendencias crecientes hasta la actualidad. Estas tendencias podrían provocar en los próximos años un incremento aún mayor de las lluvias intensas de gran magnitud. Estos resultados sugieren que habrá menor cantidad de días con lluvias de mayor intensidad y mayor cantidad de agua, dando lugar a excesos hídricos frecuentes en toda la provincia. Además, se producirán déficits estacionales con mayor frecuencia principalmente en el norte de la provincia.

Palabras clave: variabilidad climática, cambio climático, lluvias intensas, sequías.

ABSTRACT

The province of Santa Fe concentrates a large percentage of Argentina's agroindustrial production. In recent years, extreme events related to precipitation excesses and deficits have caused extended waterlogging and large droughts, severely affecting the agroindustry in the province. These extreme events may be influenced by changes in precipitation that occurred since mid-twentieth century. This study investigates the variability

¹Centro de Estudios de Variabilidad y Cambio Climático (CEVARCAM), Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral (UNL), Santa Fe, Argentina. Correo electrónico: mlovino@unl.edu.ar

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

and changes in precipitation and its extremes in different regions of the province of Santa Fe. To fulfill this aim, we used observed data with long records and controlled quality. A Singular Spectral Analysis was applied to examine the temporal variability of annual precipitation and extreme events. The extreme events were characterized by the maximum annual daily precipitation, the maximum amount of precipitation accumulated in 5 consecutive days per year, the simple daily intensity index and the consecutive dry days. The results show an increase in annual precipitation since the 1960s and a considerable rise in the frequency and magnitude of heavy rainfall throughout the province. In addition, the El Niño Southern Oscillation influence precipitation with frequencies between 2 and 6 years. In the studied stations of the northern and central regions, the annual rainfall registered an average increase of 15% since 1960 compared with the first half of the twentieth century, although upward trends seem to have stabilized after 1990. In contrast, consecutive dry days have raised significantly in recent decades. In the stations of the central-southern and southern regions, there was an increase in annual precipitation and heavy rainfall with upward trends to date. If these trends continue rising, they will generate an even greater increase in heavy rains of great magnitude in the coming years. These findings suggest that precipitation will be concentrated in fewer days with rain of greater intensity and quantity of water for each event, leading to water excesses in the whole province. Furthermore, seasonal deficits will occur more frequently, mainly in the north of the province.

Keywords: climate variability, climate change, heavy rainfalls, droughts.

INTRODUCCIÓN

La Pampa húmeda tiene una gran importancia económica y demográfica en Sudamérica y es clave para la seguridad alimentaria de la región y del mundo. La provincia de Santa Fe, como centro neurálgico de la región núcleo agrícola ganadera, desempeña un rol estratégico a nivel nacional ya que concentra un gran porcentaje de la producción agroindustrial del país. En este contexto, el clima tiene un protagonismo destacado, dado que impacta en dicha producción en forma directa.

El cambio climático es un cambio en el estado medio del clima o en su variabilidad, que se manifiesta por una tendencia en las variables climáticas durante un prolongado período (en general, se adopta un período de 30 años como período normal de referencia, definición de IPCC, 2013). En todo el planeta, los extremos de temperatura han cambiado hacia condiciones más cálidas durante los últimos 60 años y las lluvias intensas aumentaron en una fracción mayor de la superficie terrestre que en la que decrecieron, aunque ampliamente influenciados por variaciones regionales y subregionales y variabilidad en escalas temporales de interanual a decadal (Seneviratne *et al.*, 2012; Donat *et al.*, 2013). En el sudeste de Sudamérica, consistentemente con los cambios globales, los eventos hidroclimáticos tienden hacia condiciones más cálidas y húmedas ya que aumentó la magnitud y la frecuencia de extremos de temperatura y de precipitaciones intensas (Rusticucci, 2012; Cavalcanti *et al.*, 2015; Carril *et al.*, 2016). En esta región, los incrementos de la precipitación (especialmente lluvias intensas) y de los caudales contribuyeron, junto con factores antrópicos, a aumentar la frecuencia de crecidas e

inundaciones que afectaron la productividad agrícola y ganadera e impactaron los asentamientos urbanos y rurales (Magrin *et al.*, 2014).

En el nordeste argentino se produjo un importante cambio climático a partir de mediados del siglo xx con un considerable aumento de la precipitación en toda la región (Lovino *et al.*, 2014; Lovino *et al.*, 2018). Este cambio podría haber estado influenciado por condiciones antrópicas y por variabilidad decadal natural. Entre los forzantes naturales, se puede citar el enfriamiento del océano Atlántico tropical en las últimas décadas y el calentamiento del océano Pacífico tropical que podrían haber favorecido las condiciones más húmedas (Seager *et al.*, 2010; Jacques-Coper y Garreaud, 2015). También, dentro de los forzantes antrópicos, es posible que los cambios de uso de suelo hayan reducido la evapotranspiración y favorecido el escurrimiento superficial, induciendo un aumento de los caudales (Doyle y Barros, 2011).

Los impactos de los extremos climáticos y el potencial de desastres se acrecientan en las regiones con alta exposición y vulnerabilidad, pudiendo exacerbarse aún más ante un contexto complejo de variabilidad y cambio climático (IPCC, 2014). La provincia de Santa Fe es una de estas regiones ya que sus actividades agroindustriales están influenciadas por un complejo sistema de recursos hídricos superficiales en una gran llanura con escasas pendientes, concentra importantes centros urbanos y está afectada por variabilidad y cambios en la precipitación que conllevan a frecuentes y severas sequías e inundaciones (Lovino *et al.*, 2018).

Dado el contexto enunciado, este trabajo se propone investigar la variabilidad y los cambios observados en la precipitación y sus extremos en las distintas regiones de

la provincia de Santa Fe en los últimos 100 años. Para ello, se utilizan estaciones con extensos períodos de datos observados que permiten determinar la variabilidad y los cambios históricos en la precipitación anual, los eventos de precipitaciones intensas y aquellos relacionados con sequías de corto período.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos utilizados

Se utilizaron datos históricos observados en las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Se seleccionaron 8 estaciones con datos en la provincia de Santa Fe o en cercanías (tabla 1) considerando la extensión de los registros, la ausencia de períodos sin datos y la calidad de estos últimos. Las series de precipitación satisfacen los requerimientos de control de calidad establecidos en el capítulo 9 de la Guía de Prácticas Hidrológicas de la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés, 2008).

Se aplicaron controles de calidad para depurar los datos erróneos o dudosos. Se realizaron controles generales que verifican la integridad general de los datos, controles de rango fijo que aseguran que no existan valores físicamente imposibles y controles de continuidad temporal que estudian las secuencias de valores de cada variable en días consecutivos.

Se crearon las series temporales cronológicas de precipitación diaria. Además, se estimó el porcentaje de datos faltantes. Tal como se observa en la tabla 1, todas las estaciones tienen escasos o muy escasos porcentajes de datos diarios faltantes: menores al 0,5% en 6 de las 8 estaciones y de 1,16% y 3% en las dos restantes. Para reemplazar los escasos días sin datos de precipitación se utilizaron métodos basados en valores registrados en estaciones cercanas (Eischeid *et al.*, 2000): el método de la razón normal y la regresión lineal. Se definió un umbral mínimo de

correlación de 0,5 entre estaciones con datos diarios para ser rellenadas. Este valor resulta muy adecuado para datos de precipitación a escala diaria. En la bibliografía, los umbrales de correlación para relleno de datos de precipitación suelen tomarse en el rango de valores entre 0,3-0,4 (ej., Eischeid *et al.*, 2000 y sus referencias).

Métodos

Se aplicó un análisis espectral singular (SSA, por su sigla en inglés, Ghil *et al.*, 2001) para examinar la variabilidad temporal de la precipitación anual y los eventos extremos. Este método, aplicado con un ancho de ventana de 10 años, permite determinar tendencias de largo período y modos oscilatorios de las series temporales en la banda interanual (1 año <T <10 años).

Para estudiar los extremos de precipitación se aplicaron 4 índices de los definidos por el equipo de expertos en detección del cambio climático e índices de la WMO (ETCCDI, por su sigla en inglés, Zhang *et al.*, 2011). Los índices seleccionados incluyen la máxima precipitación diaria anual (RX1day), la cantidad máxima de precipitación acumulada en 5 días consecutivos por año (RX5day), el índice simple de intensidad diaria (SDII por su sigla en inglés) definido como la precipitación anual total dividida por el número de días con precipitación mayor a 1 mm y los días secos consecutivos (CDD, por su sigla en inglés) definidos como el máximo número anual de días secos consecutivos (días con precipitación menor a 1 mm) por año.

Eventos extremos históricos

La provincia de Santa Fe es altamente vulnerable a los eventos hidroclimáticos extremos en escalas temporales relevantes para la agricultura (Lovino *et al.*, 2014; Lovino, 2015). Los resultados de estos estudios muestran que a partir de 1970 se han registrado los extremos húmedos más severos de los últimos 100 años, especialmente en el centro norte de la provincia (figuras 1a y 1b). La figura

N.º	Estación	Latitud	Longitud	Período (datos mensuales)	Período (datos diarios)	Datos diarios faltantes (%)
1	Ceres AERO	-29.88	-61.95	1897 - 2017	1931 - 2017	1,16%
2	Reconquista AERO	-29.18	-59.7	1911 - 2017	1948 - 2017	3%
3	Rafaela INTA	-31.18	-61.55	1901 - 2017	1957 - 2017	0,02%
4	Paraná AERO	-31.78	-60.48	1917 - 2017	1931 - 2017	0,33%
5	Marcos Juárez	-32.68	-62.12	1910 - 2017	1961 - 2017	0,01%
6	Rosario AERO	-32.92	-60.78	1911 - 2017	1936 - 2017	0,21%
7	Laboulaye	-34.13	-63.37	1903 - 2017	1940 - 2017	0,02%
8	Pergamino INTA	-33.93	-60.55	1898 - 2017	1932 - 2017	0,07%

Tabla 1. Estaciones con extensos períodos de datos y escaso porcentaje de faltantes utilizadas para detectar señales de variabilidad y cambio climático en la provincia de Santa Fe.

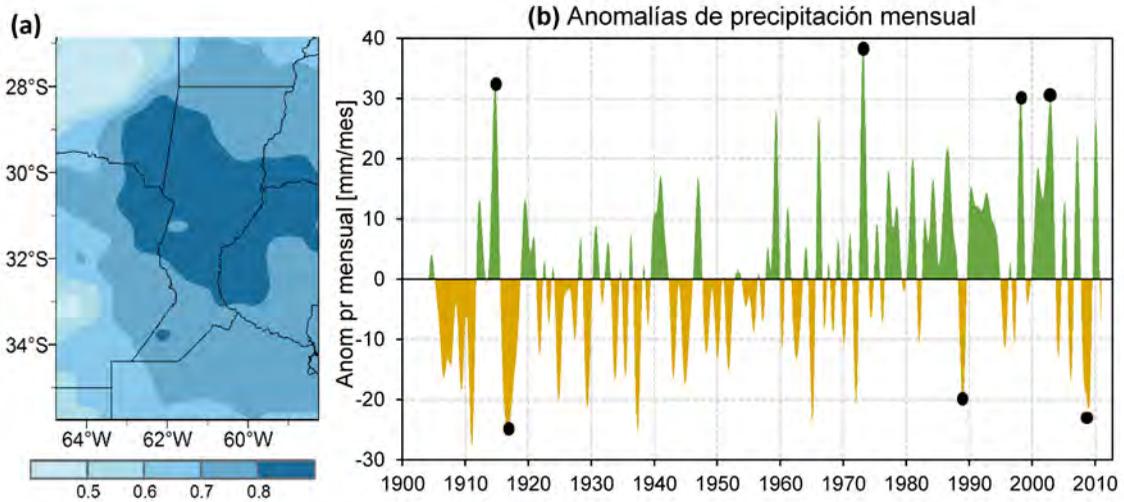


Figura 1. (a) Correlación entre las series temporales de precipitación mensual del Global Precipitation Climatology Centre dataset version 7 (GPCC v7, Schneider *et al.*, 2015) de cada punto grilla a 0.5° de resolución espacial del mapa y la serie temporal media areal de anomalías en el panel. (b) Se remarcan con puntos negros los eventos extremos más severos del siglo xx. Adaptado de Lovino *et al.* (2018).

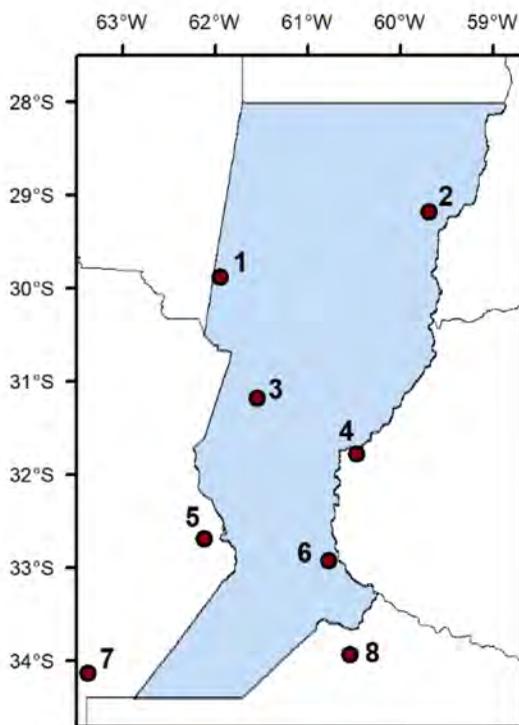


Figura 2. Estaciones con extensos períodos de datos utilizadas para detectar señales de variabilidad y cambio climático en la provincia de Santa Fe o en cercanías (tabla 1).

1b muestra que las sequías más severas en la región ocurrieron entre 1901 y 1960, con un extenso episodio bajo condiciones muy secas entre 1921 y 1939; mientras que un período de extremos húmedos de larga duración y gran intensidad se registró entre 1970 y 2005.

Los eventos extremos más severos han ocurrido durante años de El Niño o La Niña fuertes o muy fuertes, incluyendo los extremos húmedos de 1914, 1972-1973 y 1997-1998 y las sequías severas de 1916-1917 y 1988-1989 (puntos negros en la figura 1b). Sin embargo, el ENOS no es el único forzante del clima local. La figura 1b muestra que se registraron condiciones extremadamente húmedas en 2002-2003 durante un evento El Niño moderado, y una sequía muy severa en 2008-2009 durante un evento La Niña moderado. Diferentes estudios han demostrado que otros forzantes oceánicos como las temperaturas superficiales del mar en el Atlántico tropical del norte o la Zona de Convergencia del Atlántico Sur se pueden combinar con el ENOS para intensificar o atenuar los extremos húmedos o secos (Seager *et al.*, 2010; Mo y Berbery, 2011). Otro factor importante es la circulación atmosférica que puede favorecer o inhibir el desarrollo de sistemas de precipitación durante largos períodos. Además de estos forzantes, existen factores regionales y locales que pueden contribuir a una modulación del evento extremo una vez que se inicia (Mo y Schemm, 2008). La época del año, el transporte de humedad y las condiciones de humedad del suelo son todos factores que influyen en la duración e intensidad de las sequías o los excesos hídricos.

Variabilidad y cambios en los extremos de precipitación. Análisis zonal

Los cambios y la variabilidad en la precipitación y sus extremos han afectado las actividades productivas y la población de la provincia de Santa Fe, principalmente a través de tormentas intensas, aunque también por déficits que conllevan a severas sequías. Las observaciones en estaciones meteorológicas distribuidas en diferentes regiones de la provincia o

Estación	Modos dominantes de variabilidad o tendencias				
	Pr anual	RX1day	RX5day	SDII	CDD
1 - Ceres AERO	Ten (15,5)	Ten (18,5)	Ten (23,5)	Ten (24)	Ten (18)
	9 (30)				
	5,2 (22,5)	2,5 (28,5)	2,2 (29)		6,5 (24)
2 - Reconquista AERO	Ten (15)	Ten (15)	Ten (12)	Ten (15,2)	Ten (19,5)
	8,6 (23)				
	6,5 (27,5)	4 (25)	4 (31)	4 (36)	4 (31)
3 - Rafaela INTA	Ten (12,3)	Ten (16)	Ten (14)	Ten (19)	Ten (13)
		8,5 (22,5)			
	6,5 (26)		4,3 (22,5)	4,3 (26,5)	
	3,4 (22,3)	3 (24,4)	2,5 (27,4)	3 (22,7)	3 (18)
4 - Paraná AERO	Ten (21,5)	Ten (12)	Ten (12,3)	Ten (16,1)	Ten (12)
	8,5 (12,3)	8,8 (32,3)	8,8 (29,7)		
	6,5 (15)			6,5 (20,1)	
	2,7 (20,2)	2,8 (20,5)	2,5 (22,1)	2,4 (23,1)	3,6 (29)
5 - Marcos Juárez	Ten (14,7)	Ten (8,9)	Ten (15,7)	Ten (12,4)	Ten (12,3)
		8,5 (32)			
	7 (24,3)	3,7 (26)	4,2 (27,2)	5 (32)	
	2,7 (27,6)				2,3 (32,4)
6 - Rosario	Ten (9)	Ten (13,4)	Ten (9)	Ten (10,7)	Ten (14,8)
	7 (34,5)		5,7 (25,8)	5,7 (32,5)	
	2,7 (25,5)	2,1 (29)	2,5 (31,2)		2,5 (22,7)
7 - Laboulaye	Ten (20,2)	Ten (12,7)	Ten (6,5)	Ten (33)	Ten (12)
	7 (19,7)		4,5 (26)		
	2,8 (25,6)	2,2 (30)	3,1 (22,3)	3,1 (12)	3,2 (21,8)
8 - Pergamino	Ten (10,2)	Ten (10,5)	Ten (8,8)	Ten (9,3)	Ten ()
	6,6 (23)		2,8 (21,2)		
	2,5 (28,2)	3,5 (26)	2,2 (24,5)	2,2 (32,5)	2,2 (26,8)

Tabla 2. Tendencias y ciclos dominantes hallados con SSA en cada estación y en cada serie temporal. El porcentaje de varianza explicado por cada modo de variabilidad se presenta entre paréntesis. Ten: tendencia.

en cercanías (figura 2 y tabla 1) permiten obtener una regionalización de las señales de cambio y variabilidad climática.

La tabla 2 resume los resultados del SSA aplicado a cada una de las estaciones estudiadas y a cada serie temporal. Todas las estaciones registraron tendencias no lineales tanto en la precipitación anual como en los índices representativos de extremos de precipitación. En la mayor parte de los casos estas tendencias son crecientes. Además, se encontraron ciclos en dos bandas diferenciadas: una banda con periodicidades cercanas a las decadales y otra con períodos oscilando entre 2 y 7 años. Esta última banda se encuentra en el rango de periodicidades dominantes del ENOS (Garreaud *et al.*, 2009; Lovino *et al.*, 2018). La ban-

da cercana a la decadal se ha asociado con la influencia de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por su sigla en inglés; Krepper y García, 2004).

Estación Ceres (noroeste de la provincia)

La estación Ceres AERO, ubicada en el noroeste de la provincia de Santa Fe, presenta una tendencia positiva que manifiesta un incremento en la precipitación anual (figura 3a). El salto de la media de precipitación anual se produjo en la década de 1960, manteniéndose estacionario hasta la actualidad en un valor medio cercano a 1000 mm anuales en contraposición a la media en el período 1897-

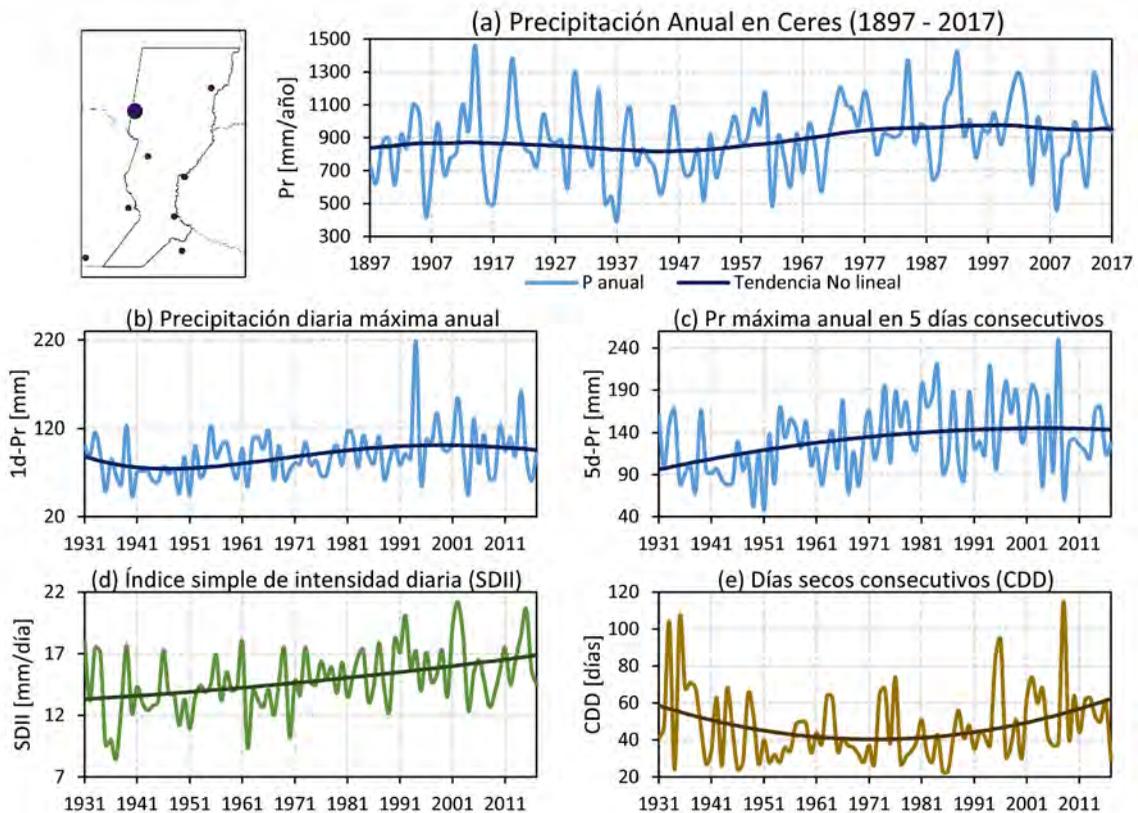


Figura 3. Series temporales en Ceres de (a) Precipitación anual (1897-2017) y de extremos de precipitación (1931-2017), (b) precipitación diaria máxima anual (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (d) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

1960 próxima a 880 mm. Además, la precipitación anual está fuertemente influenciada por la variabilidad interanual con ciclos de 5.2 años, posiblemente relacionados con el ENOS y de 9 años (ver tabla 2). Estos ciclos contribuyen a la formación de eventos extremos de déficits y excesos de precipitaciones con dichas periodicidades.

Los extremos de precipitación han cambiado en las últimas décadas en Ceres. La precipitación diaria máxima anual (figura 3b) tiene una tendencia positiva a partir de 1960 que se ha estabilizado y revertido levemente en la década de 1990. Es muy notorio el incremento de tormentas de gran intensidad concentradas en períodos cortos a partir de 1990, superando muchas de ellas los 150 mm diarios y logrando un récord absoluto en 1994 con 219 mm en un día. Un comportamiento similar tiene la precipitación máxima anual en 5 días consecutivos (figura 3c); a partir de 1970 se registraron eventos con más de 200 mm con muy alta frecuencia, prácticamente cada dos años entre 1997 y 2007. Consecuentemente, estos eventos extremos muestran una gran variabilidad interanual con predominancia de un patrón cíclico cercano a los dos años que explica cerca del 30% de la varianza de las series de precipitación máxima anual en uno y cinco días consecutivos (tabla 2). Este patrón cíclico contribuye a la intercalación de los valores máximos anuales

(ej., 2003, 2005 y 2007) con años de escasa precipitación (ej. 2004 y 2008). El SDII también muestra una tendencia claramente positiva (figura 3d) que manifiesta un incremento muy notorio de la intensidad de las tormentas que concentran mayor cantidad de lluvia en menos días.

La figura 3e indica que se ha incrementado la cantidad de días secos consecutivos en las últimas décadas. Se registraron altos valores de CDD durante la década de 1930, conocida por ser una década de condiciones muy secas en esta zona (ver Eventos extremos históricos). Posteriormente, entre 1940 y 1990 los días secos consecutivos han alcanzado picos de no más de 70 días. A partir de la década de 1990 se observa una tendencia positiva creciente hasta la actualidad. En este período se registraron sequías severas como la de 1996 o 2008. En esta última se dieron 115 días consecutivos sin precipitación entre los meses de junio y septiembre.

Estación Reconquista (noreste de la provincia)

La estación Reconquista AERO, ubicada al noreste de la provincia, también tuvo un importante incremento de la precipitación anual a partir de la década de 1960, pasando

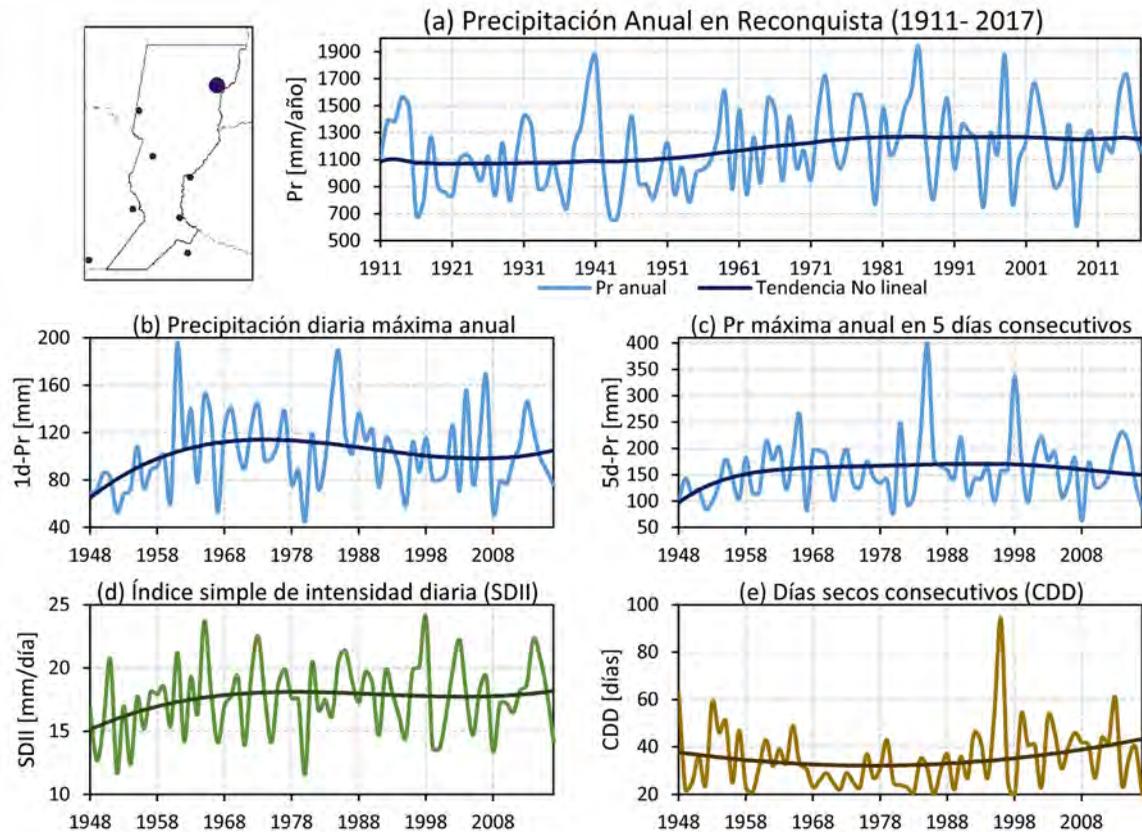


Figura 4. Series temporales en Reconquista de (a) Precipitación anual (1911-2017) y de extremos de precipitación (1948-2017), (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (c) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

de valores medios de 1100 mm anuales a aproximadamente 1270 mm (figura 4a), lo que implica un incremento medio del 15%. Similar a la estación de Ceres, ubicada en la zona noroeste de la provincia de Santa Fe, la variabilidad interanual tiene un rol preponderante en la formación de excesos y déficits de precipitación, con ciclos dominantes de 6,5 años vinculados con los eventos de El Niño para excesos y La Niña para déficits y de 8,6 años posiblemente relacionados con la NAO (ver tabla 2).

Los extremos de precipitación indican un aumento considerable reflejado en los valores diarios máximos anuales (figura 4b) y en los máximos anuales en 5 días consecutivos (figura 4c) como así también en la intensidad de la precipitación (figura 4d). Estos cambios se dieron entre las décadas de 1960 y 1970 para luego estabilizarse. Los extremos superiores a 120 mm en un día son frecuentes en esta región (un evento mayor a 120 mm por día cada 4 años, figura 4a). También se ha registrado un incremento de los días secos consecutivos a partir de 1990 (figura 4e).

Los extremos de precipitación en Reconquista muestran una periodicidad dominante de 4 años que explica un alto porcentaje de las varianzas de las series temporales de los

índices estudiados cercano al 30% en los cuatro índices (tabla 2). Este hallazgo indica una fuerte implicancia de la variabilidad interanual en la modulación de los extremos de precipitación en la estación Reconquista.

Estación Rafaela (centro-oeste de la provincia)

La estación Rafaela INTA, ubicada en el centro-oeste de la provincia, también muestra un aumento de la precipitación anual a partir de 1960 (figura 5a). Este cambio supone un incremento del 15%, variando desde un valor medio de 890 mm entre 1900 y 1960 a 1020 entre 1970 y 2017. En esta región la variabilidad interanual de la precipitación muestra una gran influencia de El Niño y La Niña, con ciclos de entre 3,4 y 6,5 años que explican el 48% de la varianza de la serie de precipitación anual (tabla 2). Estos ciclos contribuyen a la formación de importantes sequías o excesos hídricos.

De la misma manera que en las estaciones del norte de la provincia, se observó un incremento en los eventos de precipitación intensa de 1 y 5 días (figuras 5b y 5c) entre 1960 y 1980. Posteriormente, los valores medios permanecen constantes aunque la frecuencia y severidad de llu-

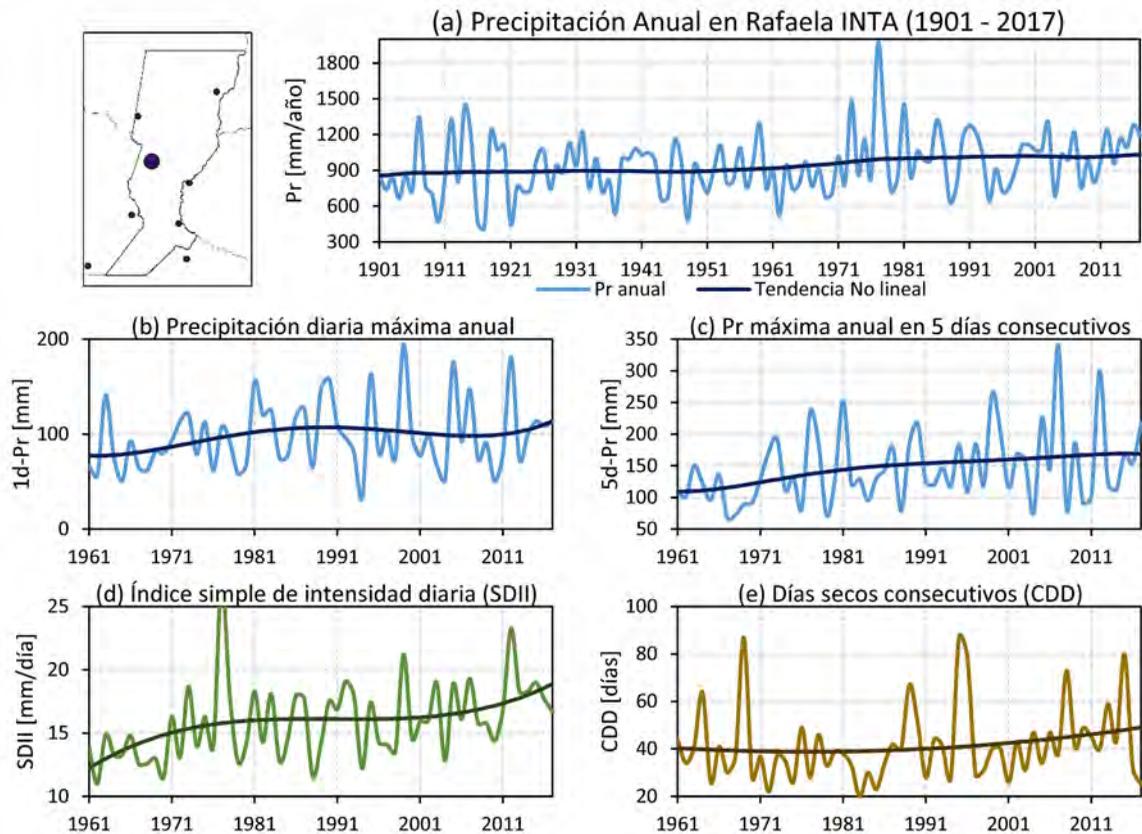


Figura 5. Series temporales en Rafaela de (a) Precipitación anual (1901-2017) y de extremos de precipitación (1961-2017), (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (d) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

vias intensas aumentaron (figura 5d). Por ejemplo, se han registrado eventos cercanos a 200 mm en un día en 1999, 2005 y 2012 (figura 5b), y de hasta 350 mm en 5 días en 2007 (figura 5c). Este aumento de intensidad se aprecia en la figura 5d con el SDII, cuya tendencia crece entre 1960 y 1980 y a partir de la década del 2000. También se registra un leve incremento de los días secos consecutivos (figura 5e), aunque no tan manifiesto como se observó en las estaciones del norte de la provincia. Finalmente, la variabilidad interanual de los extremos de precipitación se concentra en la banda relacionada con el ENOS (tabla 2). En este caso, los ciclos predominantes oscilan con altas frecuencias de entre 2,5 y 4,3 años explicando grandes porcentajes de la varianza de cada serie temporal.

Estación Paraná (limitando con el centro-este de la provincia)

La precipitación anual muestra un importante aumento a partir de 1960 en la estación Paraná AERO, limitando con el centro-este de la provincia, creciendo de valores medios de 950 mm entre 1917 y 1960 hasta aproximadamente 1100 mm entre 1980 y 2017 (figura 6a), lo que representa un incremento del 16% anual. La precipitación en Paraná presenta una

gran variabilidad interanual, afectada por el comportamiento cíclico asociado a los eventos El Niño y La Niña de entre 2,7 y 6,5 años y con ciclos próximos a los 9 años (tabla 2).

Los extremos de precipitación presentan un aumento en la magnitud de los eventos de lluvia máxima anual de 1 y 5 días (figuras 6b y 6c). Se observa un incremento en la intensidad de las tormentas a partir de la década de 1970, y en particular en las décadas de 1990 y 2000 con picos de aproximadamente 200 mm/día y cercanos a 300 mm en 5 días. Contrariamente a lo observado en el norte provincial, los días secos consecutivos han disminuido levemente a partir de 1970 (figura 6e). Al igual que en Rafaela los eventos extremos de precipitación ciclan con altas frecuencias (entre 2,4 y 3,6 años; ver tabla 2). Esta variabilidad se observa con picos muy notorios a partir de 1990 en la máxima precipitación anual en 5 días consecutivos (figura 6c) y en los días secos consecutivos en las décadas de 1940 y 1950 (figura 6e).

Estación Marcos Juárez (limitando con el centro-suroeste de la provincia)

Los valores medios de la precipitación anual se han incrementado en Marcos Juárez, limitando con el centro-

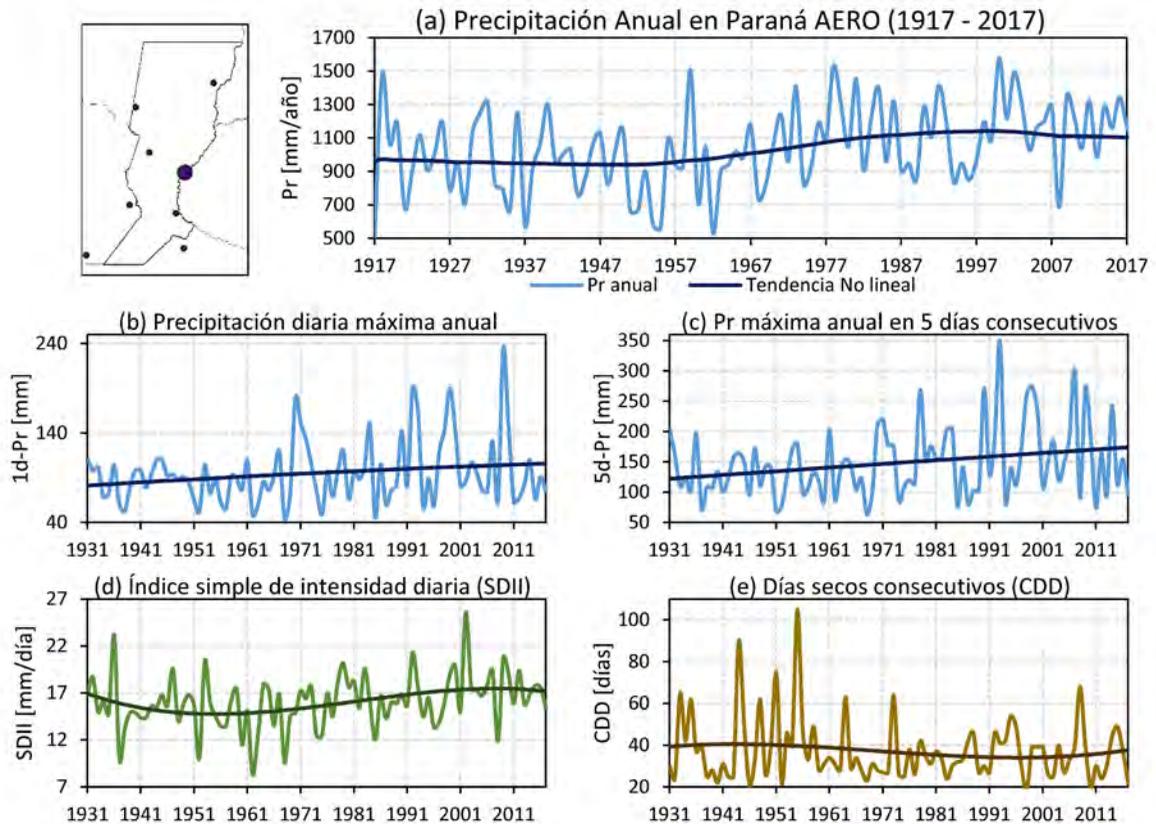


Figura 6. Series temporales en Paraná de (a) Precipitación anual (1917-2017) y de extremos de precipitación (1931-2017), (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (d) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

suroeste de la provincia, tal como en el resto del territorio provincial. La tendencia en la estación Marcos Juárez aumenta desde principios del siglo xx (figura 7a). También se observa una gran variabilidad interanual con ciclos de entre 2,7 y 7 años (tabla 2), originando años con déficits marcados (principalmente asociados a eventos La Niña) y años con excesos (fundamentalmente asociados a eventos El Niño).

Los eventos extremos de lluvias intensas no se han incrementado en Marcos Juárez tal como en las demás estaciones analizadas. Se observa una tendencia no lineal en los máximos anuales de precipitación en uno y cinco días (figuras 7b y 7c) y en el índice SDII que manifiesta un incremento en la década de 1960 y luego se estaciona hasta la actualidad, excepto para SDII que crece en la década de 2000 (figura 7d). También se registró un leve incremento de los días secos consecutivos a partir de la década del 2000, con un pico durante la sequía del año 2008 de 110 días consecutivos sin precipitaciones. La tabla 2 muestra que los ciclos dominantes de variabilidad de los extremos de precipitación oscilan entre 3,7 y 4,5 años para los eventos de lluvias intensas (es decir, RX1day, RX5day y SDII; figuras 7b, 7c y 7d) y con una frecuencia de 2,3 años en los días secos consecutivos (CDD, figura 7e).

Estación Rosario (centro-sureste de la provincia)

Rosario AERO, estación que se ubica en el centro-sureste de la provincia, presenta un incremento de la precipitación anual a partir de principios del siglo xx, pasando de valores medios de 950 mm hasta el año 1960 a 1050 mm entre 1970 y 2017 (figura 8a). Si bien este aumento significa un 10% de los promedios anuales (algo menor al incremento en el norte de la provincia), las tendencias son crecientes en la actualidad. Nuevamente, la variabilidad interanual tiene un rol fundamental en el desarrollo de años con déficits y excesos hídricos a través de ciclos de entre 2,7 y 7 años (tabla 2), principalmente influenciados por los eventos El Niño y La Niña.

Los eventos extremos de precipitación muestran un aumento en magnitud e intensidad a partir de 1980 (figuras 8b, 8c y 8d), alcanzando un pico en 5 días consecutivos de 365 mm en 2007 (figura 8c). El SDII muestra una tendencia positiva a partir de 1990 (figura 8d). Los días secos consecutivos (figura 8e), si bien se mantienen en el rango histórico con máximos cercanos a los 60 días, también han aumentado en sus valores medios a partir de 1970. Nuevamente se destaca la variabilidad interanual de alta frecuencia, con mayoría de ciclos cercanos a los 2,5 años en los índices de RX1day, R5day y CDD (tabla 2).

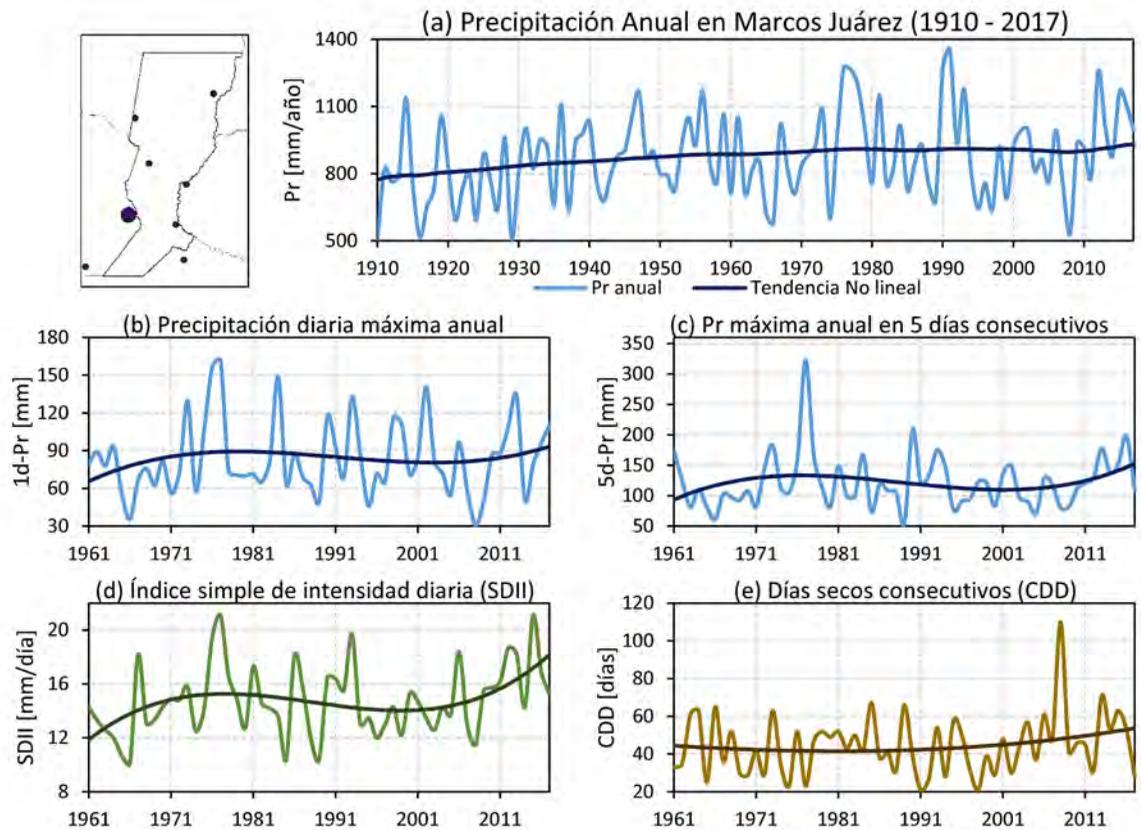


Figura 7. Series temporales en Marcos Juárez de (a) Precipitación anual (1910-2017) y de extremos de precipitación (1961-2017), (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (d) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

Estación Laboulaye (limitando con el suroeste de la provincia)

En la estación Laboulaye, limitando con el extremo suroeste de la provincia, la tendencia observada de la precipitación anual es creciente desde 1903, pasando de valores medios cercanos a los 700 mm a principios de siglo, a 950 mm en la actualidad (figura 9a). Esta zona presenta una variabilidad interanual con ciclos dominantes de alta frecuencia (2,7 años) que explican el 25,6% de la varianza de la serie temporal y de 7 años que representan el 19,7% de la varianza (tabla 2). Este comportamiento cíclico favorece excesos y déficits de precipitación interanual en cortos períodos.

Los extremos de precipitación no registran un incremento tan notorio en magnitud y frecuencia como en el resto de la provincia, aunque presentan un aumento medio a partir de la década de 2000 (figuras 9b y 9c). La intensidad de las lluvias muestra una tendencia en los valores medios a partir de la década de 1990, aunque los picos se dieron en las décadas de 1950 y 1970 (figura 9d). Los días secos consecutivos no tienen una tendencia creciente diferenciada, con valores máximos de aproximadamente 70 días. Se nota una amplia implicancia de la variabilidad interanual de alta frecuencia en los extremos de precipitación, con ciclos

dominantes muy notorios de entre 2,2 y 3,2 años (tabla 2; figuras 9b-e).

Estación Pergamino (limitando con el sureste de la provincia)

En la estación Pergamino, limitando con el extremo sureste de la provincia, la precipitación anual presenta una tendencia creciente en todo el período analizado, aumentando desde aproximadamente 850 mm por año a principios de siglo, a 1050 mm por año en 2017 (figura 10a). La tabla 2 muestra que en esta zona se destaca la variabilidad interanual con ciclos de muy corto período (2 años, representando el 28% de la varianza de la serie temporal), aunque tienen una importante implicancia los ciclos de hasta 6 años. Los dos ciclos hallados pueden estar muy influenciados por los eventos de El Niño y La Niña asociados con excesos y déficits de precipitación, respectivamente.

Al igual que en Laboulaye, en el suroeste, los extremos de precipitación no registran un incremento tan notorio en magnitud y frecuencia como en el resto de la provincia (figuras 10b y 10c). La intensidad de las lluvias ha fluctuado con variaciones decadales (figura 10d). A diferencia del

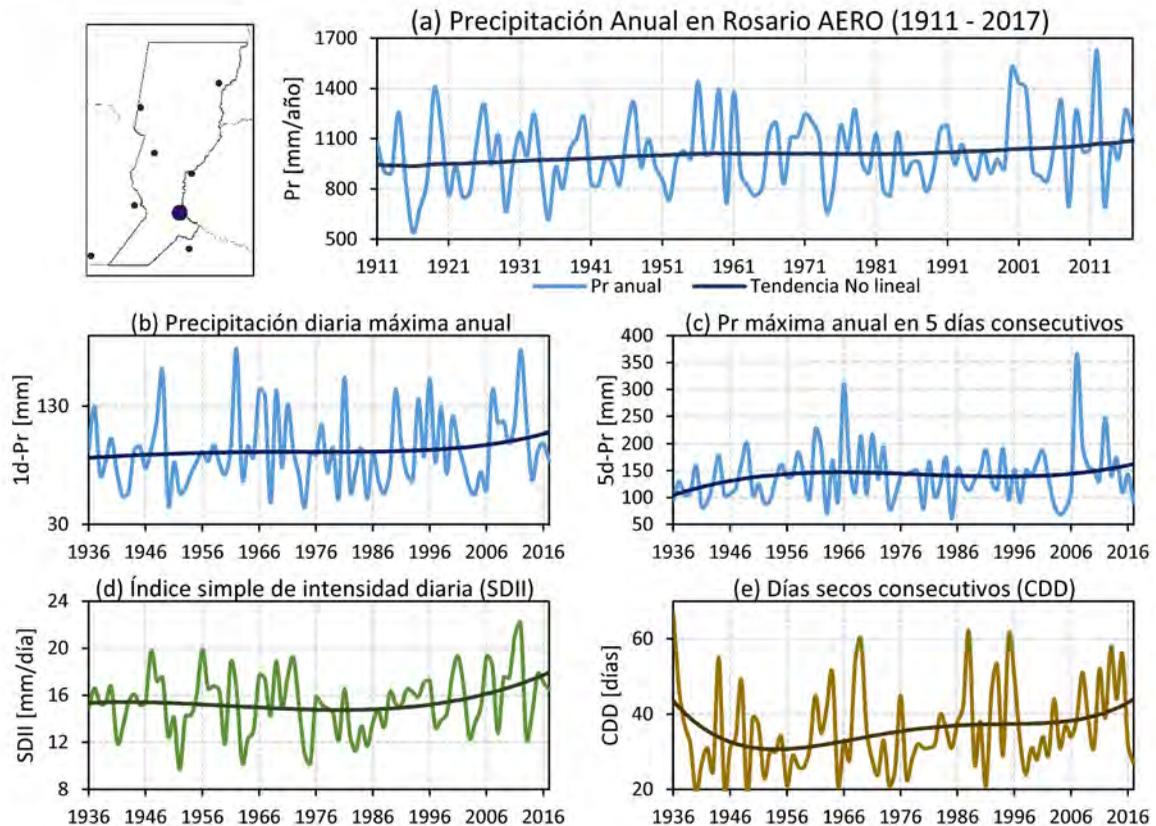


Figura 8. Series temporales en Rosario de (a) Precipitación anual (1911-2017) y de extremos de precipitación (1936-2017), (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (d) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

resto de la provincia, los días secos consecutivos presentan una leve tendencia negativa a partir de 2000 con valores extremos de aproximadamente 60 días en todo el período analizado. De la misma manera que en Laboulaye, es muy notoria la implicancia de la variabilidad interanual de corto período en los extremos de precipitación con ciclos dominantes de entre 2,2 y 3,4 años que explican importantes porcentajes de las varianzas de los índices estudiados (ver tabla 2 y figuras 10b-e).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron los cambios y la variabilidad de la precipitación y sus extremos en la provincia de Santa Fe. Los eventos extremos se caracterizaron a partir de la máxima precipitación diaria anual, la máxima precipitación anual acumulada en 5 días, los eventos de lluvias intensas y los días secos consecutivos. Se efectuó un análisis por regiones considerando 8 estaciones meteorológicas distribuidas en la provincia, con períodos prolongados de datos con control de calidad. Por un lado, en toda la provincia se registró un incremento en la precipitación anual a partir de la década de 1960 y

un incremento considerable en la frecuencia y magnitud de los eventos de lluvias intensas. Además, la precipitación anual está influenciada por el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) con frecuencias de entre 2 y 6 años y por un ciclo cercano al decadal relacionado con la Oscilación del Atlántico Norte (NAO, por su sigla en inglés) con mayor preponderancia en el norte de la provincia. Por otro lado, los eventos extremos registran una variabilidad de muy corto período, con frecuencias de entre 2 y 4 años.

Las estaciones del norte (Ceres y Reconquista) y del centro (Rafaela y Paraná) de la provincia tuvieron un incremento de la precipitación anual cercano al 15% a partir de la década de 1960. Una particularidad de estas tendencias es que muestran haberse estabilizado a partir de la década de 1990. También se registró un aumento de los eventos de lluvias intensas en 1 y 5 días tanto en magnitud como en frecuencia. En contraposición, los días secos consecutivos han aumentado en las últimas décadas de manera significativa en el norte de la provincia y con menor significancia en Rafaela. Estos resultados sugieren que, en el norte y el centro de la provincia, la precipitación se concentra en menos cantidad de días con lluvia y con

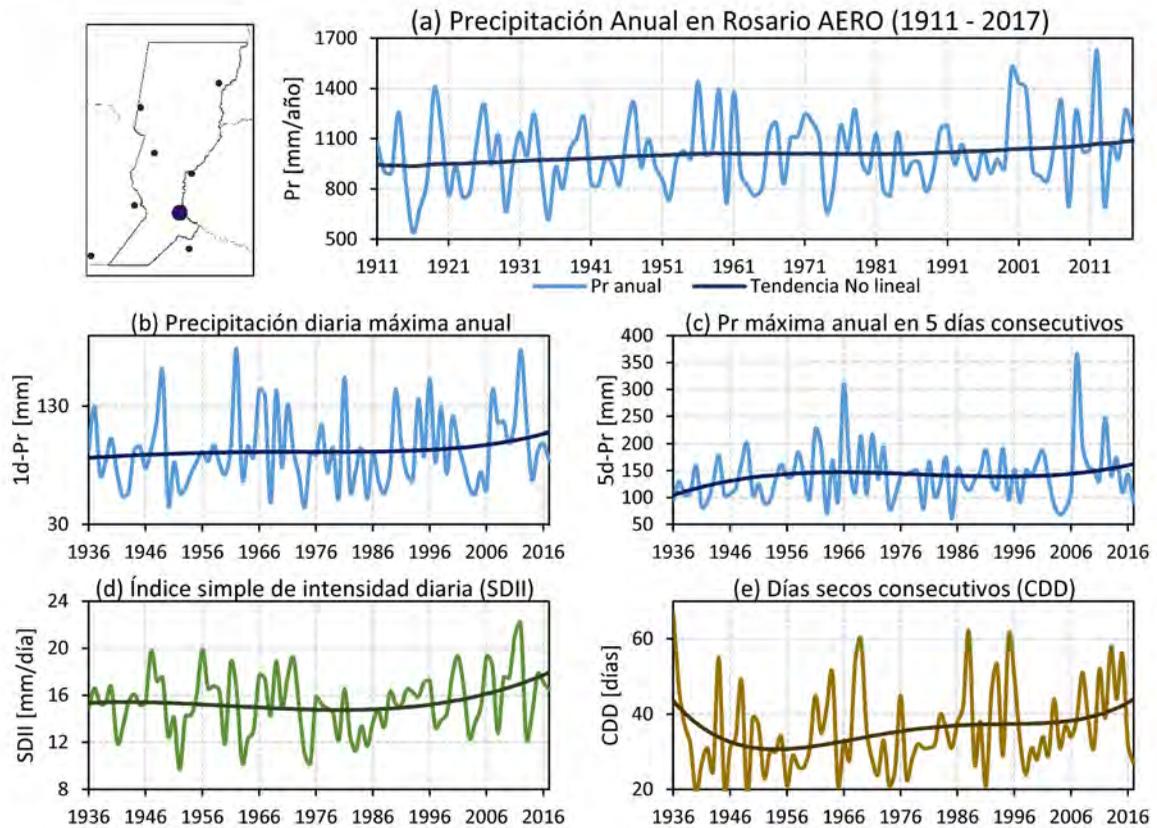


Figura 9. Series temporales en Laboulaye de (a) Precipitación anual (1903-2017) y de extremos de precipitación (1940-2017), (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (c) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

mayor cantidad de agua caída en cada evento, induciendo la chance de excesos hídricos y déficits estacionales con mayor frecuencia.

En las estaciones del centro-sur (Marcos Juárez y Rosario) y del sur (Laboulaye y Pergamino) se registraron incrementos en la precipitación anual con tendencias crecientes hasta la actualidad, a diferencia de lo observado en el norte de la provincia donde las tendencias se estabilizaron. La precipitación anual aumentó a partir de 1960 un 10% en la región centro-sur y aproximadamente un 20% en la región sur de la provincia. Los eventos extremos de lluvias intensas asociados a la máxima precipitación diaria anual y la máxima precipitación anual acumulada en 5 días también presentan tendencias crecientes hasta la actualidad. Estas tendencias podrían generar un incremento aun mayor de las lluvias intensas de gran magnitud en los próximos años.

Estos resultados permiten detectar las señales de variabilidad y cambios presentes en la precipitación anual y en los eventos extremos de lluvias intensas y de sequías estacionales de toda la provincia de Santa Fe. Existe abundante evidencia que demuestra que los cambios en la frecuencia, intensidad, duración y extensión espacial de

tales eventos aumentarán la vulnerabilidad y la exposición de los dinámicos sistemas socioecológicos ocasionando desastres sin precedentes (Seneviratne *et al.*, 2012; Magrin *et al.*, 2014). En este contexto surge la necesidad de mejorar los sistemas de gestión del riesgo climático que enfrenta la provincia para lo cual resulta fundamental el conocimiento de la variabilidad y los cambios históricos en la precipitación y sus extremos. De esta manera, los tomadores de decisión pueden contar con información con base científica para la elaboración de políticas públicas orientadas a aumentar la resiliencia ante desastres de origen hidroclimático en la provincia.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con el soporte de los Proyectos de Investigación Orientada (2017) de la Agencia Santafesina de Ciencia, Tecnología e Innovación IO-2017-00254 y IO-2017-00364. También se recibió soporte del proyecto financiado por la Universidad Nacional del Litoral C.A.I.+D. '016 50320180200341LI. Agradecemos las sugerencias y correcciones de los revisores que han ayudado a mejorar el trabajo.

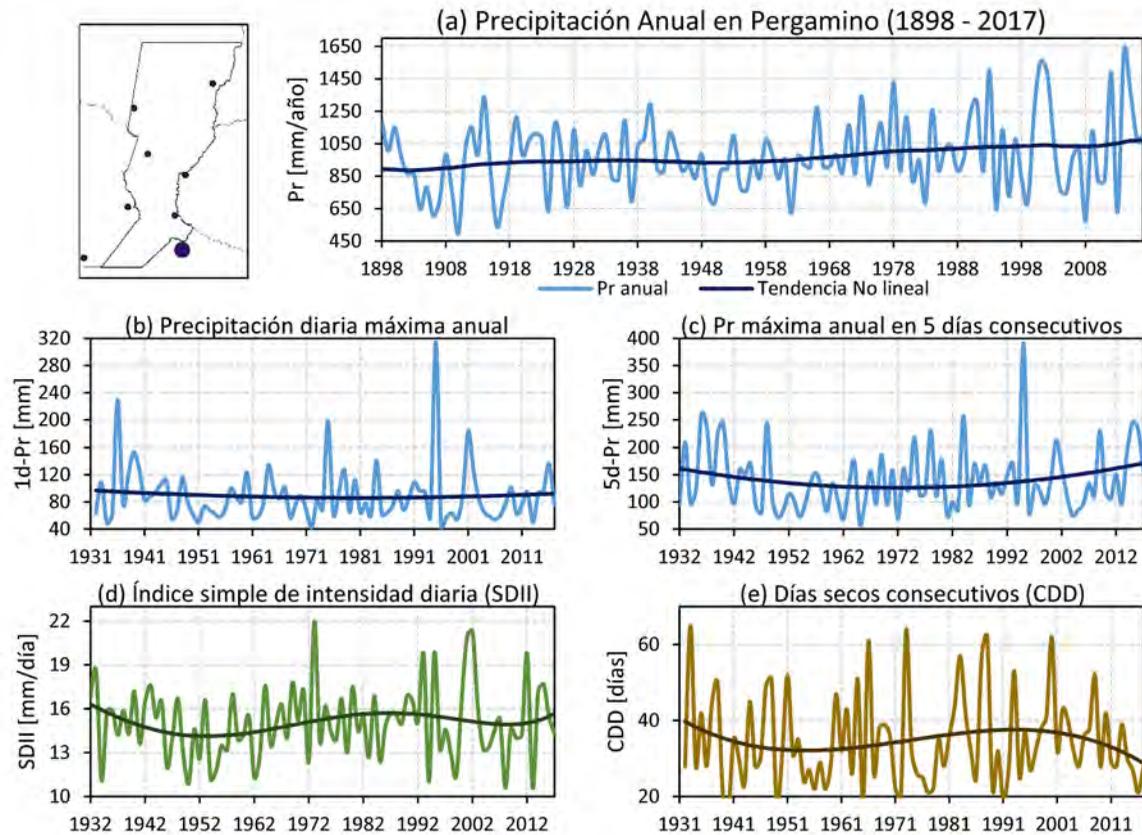


Figura 10. Series temporales en Pergamino de (a) Precipitación anual (1898-2017) y de extremos de precipitación (1932-2017), (b) precipitación diaria máxima anual, (c) precipitación máxima anual en 5 días consecutivos, (c) índice simple de intensidad (SDII) y (e) días secos consecutivos (CDD). Se resaltan las tendencias no lineales que indican los cambios de largo período en cada serie.

BIBLIOGRAFÍA

CARRIL, A.F.; CAVALCANTI, I.F.A.; MENÉNDEZ, C.G.; SÖRENSSON, A.; LÓPEZ-FRANCA, N.; RIVERA, J.; ROBLEDO, F.; ZANINELLI, P.; AMBRIZZI, T.; PENALBA, O.; DA ROCHA, R.; SÁNCHEZ, E.; BETTOLLI, M.; PESSACG, N.; RENOM, M.; RUSCICA, R.; SOLMAN, S.; TENCER, B.; GRIMM, A.; RUSTICUCCI, M.; CHERCHI, A.; TEDESCHI, R.; ZAMBONI, L.; 2016. Extreme events in the La Plata basin: a retrospective analysis of what we have learned during CLARIS-LPB project. *Clim. Res.* 68, 95-116. <http://dx.doi.org/10.3354/cr01374>

CAVALCANTI, I.F.A.; CARRIL, A.F.; PENALBA, O.C.; GRIMM, A.M.; MENÉNDEZ, C.G.; SANCHEZ, E.; CHECHI, A.; SÖRENSSON, A.; ROBLEDO, F.; RIVERA, J.; PÁNTANO, V.; BETOLLI, L.M.; ZANINELLI, P.; ZAMBONI, L.; TEDESCHI, R.G.; DOMINGUEZ, M.; RUSCICA, R.; FLACH, R., 2015. Precipitation extremes over La Plata Basin—review and new results from observations and climate simulations. *J. Hydrol.* 523, 211-230. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.028>

DONAT, M.G.; ALEXANDER, L.; YANG, H.; DURRE, I.; VOSE, R.; CAESAR, J. 2013. Global land based datasets for monitoring climatic extremes. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94, 997-1006. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00109.1>

DOYLE, M.E.; BARROS, V.R. 2011. Attribution of the river flow growth in the Plata Basin. *Int. J. Climatol.*, 31: 2234-2248. doi:10.1002/joc.2228

EISCHEID, J.; PASTERIS, P.; DIAZ, H.; PLANTICO, M.; LOTT, N. 2000. Creating a serially complete, national daily time series of temperature and precipitation for the western United States. *Journal of Applied Meteorology* 39, 1580-1591.

FIELD, C.B.; BARROS, V.R.; MACH, K.J.; MASTRANDREA, M.D.; VAN AALST, M.; ADGER, W.N.; ARENT, D.J.; BARNETT, J.; BETTS, R.; BILIR, T.E.; BIRKMANN, J.; CARMIN, J.; CHADEE, D.D.; CHALLINOR, A.J.; CHATTERJEE, M.; CRAMER, W.; DAVIDSON, D.J.; ESTRADA, Y.O.; GATTUSO, J.- P.; HIJIOKA, Y.; HOEGH-GULDBERG, O.; HUANG, H.Q.; INSAROV, G.E.; JONES, R.N.; KOVATS, R.S.; ROMERO-LANKAO, P.; LARSEN, J.N.; LOSADA, I.J.; MARENGO, J.A.; MCLEAN, R.F.; MEARNS, L.O.; MECHLER, R.; MORTON, J.F.; NIANG, I.; OKI, T.; OLWACH, J.M.; OPONDO, M.; POLOCZANSKA, E.S.; PÖRTNER, H.-O.; REDSTEER, M.H.; REISINGER, A.; REVI, A.; SCHMIDT, D.N.; SHAW, M.R.; SOLECKI, W.; STONE, D.A.; STONE, J.M.R.; STRZEPEK, K.M.; SUAREZ, A.G.; TSCHAKERT, P.; VALENTINI, R.; VICUÑA, S.; VILLAMIZAR, A.; VINCENT, K.E.; WARREN, R.; WHITE, L.L.; WILBANKS, T.J.; WONG, P.P.; YOHE, G.W. 2014. Technical summary. En: FIELD, C.B.; BARROS, V.R.; DOKKEN, D.J.; MACH, K.J.; MASTRANDREA, M.D.; BILIR, T.E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K.L.; ESTRADA, Y.O.; GENOVA, R.C.; GIRMA, B.; KISSEL, E.S.; LEVY, A.N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P.R.; WHITE, L.L. (Eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergover-*

- mental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, EUA, 35-94 pp.
- FIELD, C.B.; BARROS, V.; STOCKER, T.F.; QIN, D.; DOKKEN, D.J.; EBI, K.L.; MASTRANDREA, M.D.; MACH, K.J.; PLATTNER, G.K.; ALLEN, S.K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P.M. 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the AR5 of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EUA.
- GARREAU, R.D.; VUILLE, M.; COMPAGNUCCI, R.; MARENGO, J. 2009. Present-day South American climate, *Paleogeogr. Paleoclimatol.*, 281, 180-195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>.
- GHIL, M.; ALLEN, M.; DETTINGER, M.D.; IDE, K.; KONDRASHOV, D.; MANN, M.; ROBERTSON, A.; SAUNDERS, A.; TIAN, Y.; VARADI, F.; YIOU, P. 2001. Advanced spectral method for climatic time series. *Rev. Geophys.* 40, 1-41. <http://dx.doi.org/10.1029/2001RG000092>.
- IPCC. 2013. Planton, S. (ed). Annex III: Glossary. En: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G.K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S.K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; V. BEX, V.; MIDGLEY, P.M. (eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EUA.
- JACQUES-COPER, M.; GARREAU, R.D. 2015. Characterization of the 1970s climate shift in South America, *Int. J. Climatol.*, 35, 2164-2179, <https://doi.org/10.1002/joc.4120>
- KREPPER, C.M.; GARCÍA, N.O. 2004. Spatial and temporal structure of trends and interannual variability of precipitation over La Plata Basin, *Quatern. Int.*, 114, 11-21, [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(03\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(03)00038-7)
- LOVINO, M.A.; GARCÍA, N., BAETHGEN, W. 2014. Spatiotemporal analysis of extreme precipitation events in the Northeast region of Argentina (NEA). *J. Hydrol.: Reg. Stud.* 2, 140-158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.09.001>
- LOVINO, M.A. 2015. Impacto ambiental de la variabilidad climática y los eventos extremos en la provincia de Santa Fe, en el contexto del cambio climático. Tesis Doctoral, UNL, Argentina. (Disponible: <http://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8080/tesis/handle/11185/707> verificado: 20 de marzo de 2019). 238 p.
- LOVINO, M.A.; MÜLLER, O.V.; MÜLLER, G.V.; SGROI, L.C.; BAETHGEN, W.E. 2018. Interannual-to-multidecadal Hydroclimate Variability and its Sectoral Impacts in northeastern Argentina, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 3155-3174, <https://doi.org/10.5194/hess-22-3155-2018>
- MAGRIN, G.O.; MARENGO, J.A.; BOULANGER, J.-P.; BUCKERIDGE, M.S.; CASTELLANOS, E.; POVEDA, G.; SCARANO, F.R.; VICUÑA, S. 2014. Central and South America. En: BARROS, V.R.; FIELD, C.B.; DOKKEN, D.J.; MASTRANDREA, M.D.; MACH, K.J.; BILIR, T.E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K.L.; ESTRADA, Y.O.; GENOVA, R.C.; GIRMA, B.; KISSEL, E.S.; LEVY, A.N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P.R.; WHITE, L.L. (Eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EUA. 1499-1566 pp.
- MO, K.C.; SCHEMM, J.E. 2008. Relationships between ENSO and drought over the southeastern United States, *Geophysical Research Letters*, 35 (15).
- MO, K.C.; BERBERY, E.H. 2011. Drought and Persistent Wet Spells over South America Based on Observations and the U.S. CLIVAR Drought Experiments, *J. Climate*, 24, 1801-1820. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3874.1>
- RUSTICUCCI, M. 2012. Observed and simulated variability of extreme temperature events over South America. *Atmospheric Research*, 106, 1-17.
- SEAGER, R.; NAIK, N.; BAETHGEN, W.; ROBERTSON, A.; KUSHNIR, Y.; NAKAMURA, J.; JURBURG, S. 2010. Tropical Oceanic Causes of Interannual to Multidecadal Precipitation Variability in Southeast South America over the Past Century, *J. Climate*, 23, 5517-5539. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3578.1>
- SCHNEIDER, U.; BECKER, A.; FINGER, P.; MEYER-CHRISTOFFER, A.; RUDOLF, B.; ZIESE, M. 2015. GPCC Full Data Reanalysis Version 7.0 at 0.5: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain Gauges built on GTS-based and Historic Data. https://doi.org/10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V7_050
- SENEVIRATNE, S.I.; NICHOLLS, N.; EASTERLING, D.; GOODNESS, C.M.; KANAE, S.; KOSSIN, J.; LUO, Y.; MARENGO, J.; MCINNES, K.; RAHIMI, M.; REICHSTEIN, M.; SORTEBERG, A.; VERA, C.; ZHANG, X. 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. En: FIELD, C.B.; BARROS, V.; STOCKER, T.F.; QIN, D.; DOKKEN, D.J.; EBI, K.L.; MASTRANDREA, M.D.; MACH, K.J.; PLATTNER, G.K.; ALLEN, S.K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P.M. (Eds.), *A Special Report of Working Groups I and II of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, EUA. 109-230 pp.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), 2009. *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation*, Publication N.º 1045, World Meteorological Organization, Ginebra.
- ZHANG, X.; ALEXANDER, L.V.; HEGERL, G.C.; KLEIN-TANK, A.; PETERSON, T.C.; TREWIN, B.; ZWIERS, F.W. 2011. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Chang.* 2, 851-870. <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.147>