

VARIABILIDAD DE LA PRECIPITACION EN EL ALTIPLANO ARGENTINO. INCIDENCIA DE LA TRANSICIÓN CLIMÁTICA 1976/1977 Y DEL FENÓMENO EL NIÑO - OSCILACIÓN DEL SUR EN EL NOROESTE ARGENTINO.

Daniel Barrera^{1,2,3} y Alejandro Maggi²

dbarrera@agro.uba.ar

¹Universidad de Buenos Aires, CONICET, FAUBA, Buenos Aires, Argentina

²Departamento de Ingeniería Agrícola y Uso de la Tierra, FAUBA UBA

³Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, FCEN UBA

RESUMEN

A partir de series pluviométricas mensuales de seis localidades del Noroeste Argentino (NOA) en el período 1935/36 – 2015/16 construimos series de precipitación acumulada Octubre-Abril (O-A). Verificamos la ocurrencia de saltos climáticos en la precipitación, que están en armonía con la Transición Climática del Pacífico (TCP) de 1976/77. Mostramos que posteriormente a la TCP hubo un cambio significativo en la precipitación en la sub-región semiárida del NOA. Se hallaron tendencias decrecientes de la precipitación a partir de la década de 1990 en el NOA. Propusimos índices ENSO (El Niño – Southern Oscillation) acumulados sobre el período monzónico O-A contruidos a partir del Southern Oscillation Index (SOI), Oceanic Niño Index (ONI) y Multivariate ENSO Index (MEI). Estos manifiestan altas correlaciones cruzadas. Propusimos asimismo tres índices basados en SOI, ONI y MEI, ponderados con la precipitación media mensual del período O-A, y efectuamos regresiones polinómicas entre ellos y la precipitación O-A. Solo en La Quiaca (LQ) y Abra Pampa (AP) (la subregión altiplánica) dichos índices explican porcentajes relevantes de la variabilidad de la precipitación O-A. Comprobamos que en LQ existe una significativa mayor proporción de precipitación acumulada en octubre, noviembre y diciembre en comparación con AP. Elaboramos un criterio para clasificar, a partir del índice mensual

ONI, los períodos Octubre-Abril en fase Neutra (NE), Niña (NA) o Niño (NO). Clasificamos según fases NE, NA y NO los períodos O-A antes y a partir de la TCP. Las muestras resultaron pequeñas, lo cual torna preliminares los resultados siguientes. Se comprobó que el salto hacia mayores valores de precipitación se verifica en las tres fases. Se encontró que después de los saltos climáticos en AP y LQ hay menor variabilidad interanual de la precipitación en la fase NA con respecto a las fases NE y NO. La mayoría de los máximos de precipitación ocurren en fase NE. En ambas localidades, los valores medios de la precipitación O-A en fase NO antes y después de la TCP resultaron significativamente menores que en fases NA y NE. Asimismo se encontró un aumento de la variabilidad de la precipitación en fase NO después de la TCP.

Palabras clave: TCP, ENSO, Noroeste de Argentina, Altiplano, Precipitación

VARIABILITY OF PRECIPITATION IN THE ARGENTINIAN ALTIPLANO. INCIDENCE OF THE 1976/1977 CLIMATE TRANSITION AND THE ENSO PHENOMENON IN NORTHWESTERN ARGENTINA.

ABSTRACT

From monthly rainfall series in six locations in Northwest Argentina (NOA) in the period 1935/36 - 2015/16 we built series of cumulative rainfall for the monsoonal period October-April (O-A). We verified the occurrence of climatic jumps in precipitation, which are in harmony with the Pacific Climate Transition (TCP) 1976/77. We showed that subsequent to the TCP occurred a significant change in rainfall in the semiarid NOA sub-region. Decreasing precipitation trends from the 1990s in the NOA region were found. Three cumulative O-A ENSO indices associated to the monsoonal period were built from monthly indexes: the Southern Oscillation Index (SOI), the Oceanic Niño Index (ONI) and the Multivariate ENSO Index (MEI). They showed high

cross-correlations. We also proposed three new O-A ENSO indices (location dependent) based on SOI, ONI and MEI and weighted with the average monthly rainfall at a given location. We performed polynomial regressions relating them with O-A precipitation. These indices explained relevant percentages of O-A precipitation variability only in Abra Pampa (AP) and La Quiaca (LQ) (the Altiplano sub-region). We found that in LQ there is a significant higher proportion of accumulated rainfall in October, November and December compared to AP.

We developed one criteria to classify, from the monthly ONI index, the O-A periods as Neutral (NE), Niña (NA) and Niño (NO) phases. When splitting the record data into two sub-series (before and after the TCP) and discriminating the monsoonal periods according to ENSO phases, samples became small so the following conclusions are preliminary. Shifts to higher values of precipitation were found in all three phases. It was found that after climate shifts in AP and LQ there is less interannual variability of precipitation in the NA phases with respect to NE and NO phases. Most precipitation maximums occur in NE phase. Mean O-A precipitation in NO phase before and after the TCP were significantly lower than in NE and NA phases in both locations. Increased rainfall variability in the NO phase after the TCP was also found.

Key words: TCP, ENSO, Northwestern Argentina, Altiplano, Precipitation

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

1.1. El monzón sudamericano y su influencia sobre la precipitación en el Noroeste y Altiplano Argentinos

Luego del equinoccio de primavera, el inicio de la convección profunda en la región amazónica al sur del Ecuador, junto con los vientos alisios, inducen un flujo de aire cálido y húmedo hacia el este, que es desviado hacia el sur por la cordillera de los Andes. Este flujo es prevaleciente entre octubre y abril (González y Barros, 1998; Nogués-Paegle et al., 2002; Barros et al., 2002; Vera et al., 2006), y da origen al llamado Monzón Sudamericano (MS). Como respuesta dinámica al calentamiento de la alta tropósfera generado por la convección profunda en la región amazónica, y al

Artículo en edición

debilitamiento del gradiente térmico Ecuador-Trópico, se establece un centro de alta presión en la tropósfera media y alta conocido como Alta de Bolivia (AB) (Silva Dias et al., 1983; Lenters y Cook, 1997; Garreaud et al., 2009). En término medio el centro está ubicado en 15°S y 65°O (Vuille, 1999, Vera et al., 2006). Además, en el semestre cálido se desarrolla en niveles troposféricos bajos un centro de baja presión en la región del Chaco que es conocido como Baja del Chaco (BCH) (Nogués-Paegle et al., 2002; Vera et al., 2006; Seluchi y Saulo, 2012a). La BCH está centrada en aproximadamente 21°S y 61°O (Seluchi y Garreaud, 2012). Por otra parte, la Baja del Noroeste Argentino (BNOA) es una región de baja presión de origen termo-orográfico elongada en sentido meridional al este de los Andes, con centro aproximadamente en 30°S y 65°O (Schwerdtfeger, 1976; Lichtenstein, 1980; Seluchi et al., 2003; Ferreira et al., 2010; Seluchi y Saulo, 2012b). Su profundización en verano favorece el transporte hacia el sur de aire húmedo desde la región amazónica, que es canalizado en la tropósfera baja entre las faldas orientales de la cordillera de los Andes y la meseta central de Brasil. La circulación ciclónica alrededor de la BCH puede aportar aire húmedo a la región Noroeste (NOA) y el sudeste del Altiplano o Puna, dependiendo de las condiciones dinámicas en la alta tropósfera (Seluchi y Saulo, 2012a). En conexión con la AB aparecen vientos del este en la tropósfera media y alta sobre los Andes Centrales, que favorecen el transporte hacia el Altiplano del aire húmedo continental situado al este de aquel, el cual es necesario para el desarrollo de la convección profunda sobre la Puna (Garreaud y Seluchi, 2001; Garreaud et al., 2009). Adicionalmente, el clima del MS está regulado por los anticiclones semipermanentes del Pacífico y el Atlántico Sur (Nogués-Paegle et al., 2002; Mechoso et al., 2004; Lau y Zhou, 2003).

En el Altiplano, durante el semestre cálido el calentamiento diurno de la superficie conduce a la desestabilización de la capa límite planetaria, que eventualmente - dependiendo de la circulación en niveles troposféricos altos- induce convección profunda en la tarde y noche, la cual convierte en lluvia la humedad advectada desde el este (Garreaud, 1999; Garreaud y Seluchi, 2001). Dicha advección también produce lluvias entre octubre y abril en las estribaciones de la Puna Argentina (Barrera y Basualdo, 2012). Varios autores estudiaron la variabilidad interanual de la precipitación en el sector central y norte de la Puna (Aceituno y Montecinos, 1993; Vuille, 1999;

Vuille et al., 2000; Garreaud y Aceituno, 2001; Ronchail y Gallaire, 2006; Garreaud et al., 2009). Sin embargo, muy poco se sabe sobre la variabilidad interanual y de baja frecuencia de la precipitación en el sudeste del Altiplano, temática que se aborda con especial énfasis en este trabajo.

1.2. Transición climática del Pacífico (TCP). Relación con saltos climáticos observados en el sur de Sudamérica en la década de 1970

Está demostrado que en el término de un año -1976/1977- ocurrió una transición climática brusca en el sistema acoplado atmósfera-océano (TCP), que conecta la temperatura de la superficie del Océano Pacífico con parámetros climáticos en muchas regiones del planeta (Namias 1978; Ebbesmeyer et al., 1991; Miller et al., 1994; Solomon et al., 2007; Meehl et al., 2013). Los cambios de régimen podrían deberse a modificaciones en la temperatura superficial del mar en el Pacífico tropical (Huang et al., 2005), que estarían acompañando a la llamada Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) (Garreaud y Aceituno, 2001; Newman et al., 2016).

Por otra parte, los datos de temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial muestran que desde 1950 los eventos El Niño han sido débiles y de corta duración, mientras que los eventos La Niña fueron en general intensos y más duraderos; este patrón se invirtió a partir de 1977 (Vuille et al., 2000). Jacques-Coper y Garreaud (2015) sugirieron que el fenómeno de variabilidad interanual ENSO (El Niño - Oscilación del Sur), conjuntamente con la Oscilación Decadal del Pacífico tuvieron una incidencia decisiva en la TCP.

Vargas et al. (1995) detectaron un salto climático en enero de 1974, evidenciado por una disminución abrupta en el gradiente meridional de presión que coincide con un aumento en la precipitación en el sur de Sudamérica. Esto indicaría que el debilitamiento de la circulación zonal permitió un reforzamiento de la circulación norte-sur del MS.

Agosta y Compagnucci (2008) estudiaron el efecto de la TCP sobre las precipitaciones en la región centro-oeste de Argentina, al sur de La Puna. Observaron una fluctuación cuasi-bidecádica prevaleciente hasta mediados de la década de 1970 que da ciclos

alternantes húmedo/seco de aproximadamente 9 años de duración cada uno. Tras la TCP de 1976/77 la fluctuación se deforma, y como resultado se tiene un evento húmedo prolongado durante 30 años, que comenzó en 1973 (Compagnucci y Agosta, 2008; Russian et al., 2015).

1.3. El ENSO y sus impactos conocidos sobre la Puna

El ENSO (El Niño - Oscilación del Sur) es un fenómeno oceánico-atmosférico que causa, entre otras cosas, anomalías climáticas de temperatura en las aguas superficiales del Océano Pacífico ecuatorial; consta de dos fases anómalas contrapuestas: cálida (el Niño) y fría (la Niña) (Barnston et al, 1997). El fenómeno también se manifiesta en el gradiente zonal de presión en superficie en el Pacífico ecuatorial, y ha sido históricamente detectado mediante el Índice de Oscilación del Sur (SOI) (Troup, 1965). Los efectos del ENSO incluyen cambios en los regímenes de precipitación y otras variaciones climáticas en distintas regiones del planeta (Ropelewski y Halpert, 1987). Entre estas regiones está el Altiplano, que ocupa áreas de Perú, Chile, Bolivia y el Noroeste Argentino (NOA). El calentamiento (enfriamiento) de la tropopausa tropical durante la fase cálida (fría) del ENSO resulta en una intensificación (debilitamiento) de los vientos oestes en altura en latitudes subtropicales justo al este de los Andes y a una intensificación (debilitamiento) de la AB junto con una intensificación (debilitamiento) del flujo noroeste-sudeste en capas bajas en el flanco oriental de la cordillera de los Andes (Vuille, 1999). Ello conduce a un decrecimiento (crecimiento) del transporte regional de humedad hacia la Puna desde las tierras bajas al este de aquella. Consecuentemente, durante períodos Niño las precipitaciones son generalmente inferiores al promedio histórico, y parecería ser a la inversa durante eventos Niña aunque la señal en este caso es más débil. Este descenso de la precipitación en el Altiplano que generalmente ocurre durante una fase cálida estaría también relacionado con la inhibición de la convección profunda debida a la intensificación de la AB (Vuille, 1999; Trauth et al., 2000; Diaz et al., 2001; Garreaud y Aceituno, 2001; Nogués-Paegle et al., 2002).

Según Garreaud y Seluchi (2001) la intensidad y posición del jet subtropical parece ser la causa más importante para facilitar o dificultar el ascenso del aire húmedo desde las planicies ubicadas al este hacia el altiplano, y probablemente allí reside la relación entre la precipitación altiplánica y las fases del ENSO, ya que este modifica el comportamiento del Jet. En algunos casos esta relación causa-efecto no se cumple, lo cual indica que hay otros factores intervinientes (Ambrizzi et al., 2004).

1.4. Objetivos del trabajo

Los objetivos del presente trabajo son: a) conocer, mediante los registros pluviométricos de seis localidades de la región NOA, la posible existencia de saltos climáticos cercanos o coincidentes en tiempo con la TCP, así como la permanencia de los posibles cambios, a fin de coadyuvar al conocimiento de una coherencia climática regional; b) determinar la influencia del fenómeno ENSO sobre la variabilidad interanual de la precipitación en la región NOA, con particular énfasis en la subregión altiplánica; c) diseñar y aplicar una clasificación por fases del fenómeno ENSO válida para caracterizar el período monzónico octubre-abril (O-A); y d) diseñar y aplicar índices de intensidad del fenómeno ENSO para el período O-A relacionados con la climatología de la precipitación en la región NOA.

Cabe mencionar que la estación experimental de Abra Pampa está situada en la zona central de la Puna Argentina y posee un largo registro de datos pluviométricos. Sin embargo, por no estar incluido este en la mayoría de las bases de datos a pesar de ser irremplazable por su ubicación y representatividad, no fue usado en los estudios climáticos de los autores citados (Figuras 1a y 1b).

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La región NOA está caracterizada por una topografía compleja y heterogénea; la gran variación altitudinal causa una distribución espacial irregular de la precipitación y otras

variables climáticas, lo cual se refleja en la diversidad de la vegetación. La precipitación, concentrada en el semestre cálido, aumenta en líneas generales desde el extremo oeste-noroeste hacia el este-sudeste debido a su orografía, con máximos en los valles templados de Jujuy y Salta; al oeste de estos valles la región es árida y semiárida. (Minetti, 2005).

La Puna argentina se caracteriza por su altitud superior a 3000 m snm. Como parte del sector sur del Altiplano, tiene un clima seco y frío con escasas precipitaciones concentradas en la época estival, elevada evapotranspiración y gran amplitud térmica diaria (Cabrera, 1976; Garreaud y Aceituno, 2001). En las Figuras 1a y 1b se muestran los límites políticos provistos por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

FIGURA 1a

FIGURA 1b

2.2 Datos pluviométricos

Se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), las series de datos de precipitación mensual de los años 1935 a 2016 de las seis estaciones meteorológicas que se indican en la Tabla I. Se muestra su ubicación en la Figuras 1a y 1b.

TABLA I

Solo en dos localidades de la Puna Argentina existen series pluviométricas disponibles: Abra Pampa y La Quiaca (Figura 1b). Las cuatro localidades restantes rodean a la Puna por el sudeste y sur. De este modo podremos visualizar condiciones regionales en el NOA, en particular en su respuesta de la precipitación a la transición climática del Pacífico 1976/77 y al fenómeno ENSO.

En Abra Pampa existen dos series de datos pluviométricos: en la estación de ferrocarril (desde 1935 a 1990) y en la estación experimental del INTA. En esta última, que comenzó a funcionar en 1959, la serie tiene interrupciones en los primeros años por

falta de observaciones, por lo que decidimos trabajarla a partir de 1970, y promediar los datos de ambas estaciones en el lapso en que coexistieron, desde ese año hasta 1990.

Se construyeron, para las seis localidades, las respectivas series de valores acumulados en el período Octubre a Abril (en adelante O-A) que denominamos período monzónico, y en el cual está concentrada la precipitación. Se adopta el formato 1935/36 para referir el período octubre de 1935 a abril de 1936, y así sucesivamente.

2.3. Análisis exploratorio de saltos climáticos y de la permanencia de los cambios en la precipitación

2.3.1. Detección estadística de saltos climáticos

Con el fin de identificar la existencia de saltos climáticos en las seis estaciones mencionadas se utilizó el test de Yamamoto (Yamamoto et al., 1987) aplicado a la serie temporal de precipitación O-A. Dicho test está basado en el tratamiento estadístico de una serie de tiempo de promedios móviles de 41 valores o casos -20 consecutivos antes y después de cada caso analizado-. Se define el índice Y de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{M_b - M_a}{C_{pb} + C_{pa}} \quad (1)$$

donde los subíndices a y b indican las sub-series antes y después del caso (período O-A) analizado.

M_b y M_a : Promedios de cada sub-serie (compuesta en nuestro análisis por 20 períodos O-A)

$$C_p = \frac{s_x \cdot t_q}{\sqrt{(N-1)}} \quad (2)$$

donde

C_p : límite de confianza de las medias muestrales, de probabilidad $p\%$

s_x = desvío estándar de la muestra considerada

t_q = valor de la distribución “t-Student” con la probabilidad $q\% = (100-p\%)$

N = tamaño de la muestra considerada (igual a 20)

Se usó la distribución “t-Student” de dos colas con el valor crítico al nivel usual $\alpha=0,05$ con $N-1=19$ grados de libertad. Por lo tanto $t_q=1,73$, $q\%=10$ y la probabilidad para calcular los límites de confianza es del 90%. Según Yamamoto et al (1987) si el valor absoluto de Y supera la unidad en un caso dado es razonable concluir que en ese punto de la serie temporal las sub-muestras M_a y M_b pertenecen a poblaciones estadísticas distintas y por lo tanto la serie total es inhomogénea (con probabilidad asociada p). El valor de Y superior a uno más alto indica el año del salto climático.

Se utilizaron las series pluviométricas disponibles en las seis localidades mencionadas.

2.3.2. Determinación estadística de la significancia de los cambios en las series de precipitación

Una vez detectado un salto climático con el máximo valor del índice de Yamamoto, es pertinente efectuar el análisis de la varianza y un test de significancia a fin de comparar las series de datos antes y después del salto. Para ello, hemos propuesto dividir la serie original en dos. Llamamos Bloque 1 a la que finaliza el período O-A anterior al salto, y Bloque 2 a la serie que comienza con el período O-A del salto.

Se efectuó, para las series en las que se detecta un salto climático, el test estadístico de Tukey (Tukey, 1949), conocido y aceptado en la literatura. La prueba que utiliza el método de Tukey se basa en el test de Student de rango y parte de la hipótesis nula de que las dos muestras analizadas (bloques 1 y 2) pertenecen a la misma población estadística. Se rechaza la hipótesis nula si el estadístico de contraste, que es la diferencia de las medias muestrales normalizada por la varianza, supera el valor crítico de la distribución t de Student al nivel α . Se usó el valor usual $\alpha=0,05$. Se obtuvieron, para cada una de las sub-series de precipitación O-A, la media, el coeficiente de variación (en adelante CV), el máximo, el mínimo y la razón entre las medias de los Bloques 2 y 1.

2.3.3. Estudio de tendencias recientes de la precipitación en la región NOA.

Nos interesa establecer si los cambios que se detecten en la precipitación son permanentes y representan un cambio climático o son fluctuaciones interdecadales y se podría esperar un retorno a condiciones anteriores. Para ello es pertinente comparar los valores medios de precipitación en las seis localidades seleccionadas, al dividir el período 1976/77 – 2015/16 (a partir de la TCP) en dos sub-períodos de 20 años cada uno: 1976/77 – 1995/96 y 1996/97 – 2015/16. De esta forma pretendemos actualizar lo informado por Minetti et al. (2003) para la región NOA, quienes con series de precipitación del período 1931/32 – 1998/99 hallaron tendencias decrecientes recientes en La Quiaca y Catamarca y tendencias crecientes permanentes en las localidades de Salta, Tucumán y La Rioja.

También se efectúa la comparación con las medias respectivas de la sub-serie 1935/36 – 1975/76.

2.4. Índices ENSO representativos del período monzónico y grado de asociación entre ellos.

Los eventos ENSO se han identificado históricamente por medio de tres índices, que usamos en este trabajo. Se analizaron los valores mensuales de los períodos O-A desde 1950/51 hasta 2015/16.

El primero de estos índices, y el más antiguo, es el Southern Oscillation Index (SOI) que se calcula con valores de presión media mensual estandarizada a nivel del mar en las localidades de Tahití (Pacífico central) y Darwin (Pacífico occidental) (Troup, 1965). Los datos del índice SOI usados en este trabajo se obtuvieron, para el lapso a partir de febrero de 1951, disponibles en el sitio <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> y fueron elaborados por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Los índices SOI están definidos por la NOAA para cada mes del año, como promedios móviles de tres meses centrados en el mes analizado, y son calculados a partir de los respectivos índices mensuales. La serie

Artículo en edición

se completó con los índices correspondientes a los meses de octubre de 1950 a enero de 1951. Para ello calculamos los respectivos promedios móviles de tres meses, a partir de los índices mensuales originales que se obtuvieron del Bureau of Meteorology de Australia, del sitio http://www.bom.gov.au/climate/enso/soi_monthly.txt.

El segundo índice usado es el ONI (Oceanic Niño Index), definido como el promedio móvil de tres meses de las anomalías mensuales de temperatura de la superficie del mar, cuyos valores son tomados de la base de datos del Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) en la región Niño 3.4 (5°S–5°N, 120°O–170°O) (Barnston et al., 1997). Las anomalías son desviaciones del valor medio sobre un período que abarca los últimos 30 años, y que se actualiza cada cinco años. Los datos mensuales del índice ONI se obtuvieron del sitio web de la NOAA antes mencionado.

El tercer índice utilizado, el Multivariate ENSO Index (MEI), fue elaborado usando la técnica de componentes principales, en la cual las variables explicativas son la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico tropical (que actualmente es estimada mediante teledetección remota satelital) y cinco variables atmosféricas en la misma región generadas por un modelo numérico de circulación global: presión atmosférica superficial, componentes zonal y meridional del viento en superficie, temperatura del aire en superficie y nubosidad (Wolter y Timlin, 1998 y 2011). Los índices MEI son bimensuales y la NOAA construye una serie MEI mensual efectuando promedios móviles del mes en cuestión (i) y el anterior (i-1). Esta serie está disponible en el sitio web: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/table.html>.

Se construyeron series de valores acumulados en el período O-A de los índices mensuales SOI, ONI y MEI. Para este último (que es un promedio móvil bimensual) se consideró como valor del mes (i) el obtenido con los meses (i) e (i-1). A los efectos de relacionar la precipitación del mes i con el índice MEI sus autores recomiendan tomar el mes i del índice, pues hay un retraso de aproximadamente una semana en la respuesta atmosférica a las anomalías de la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico tropical, de modo que el mes anterior también está involucrado (Wolter y Timlin, 2011).

A estos nuevos índices los denominamos SOI_{O-A} , ONI_{O-A} y MEI_{O-A} ; los mismos son independientes de la región estudiada en este trabajo. Se efectuaron regresiones lineales y polinómicas de orden 2 entre los tres índices tomados de a pares, y se obtuvieron los coeficientes de determinación respectivos, a fin de determinar el grado de asociación entre ellos.

2.5. Relaciones entre la precipitación y las fases ENSO

Puesto que en nuestro trabajo necesitamos índices representativos del período O-A (que cubre en gran medida la estación lluviosa) para comparar con la precipitación acumulada en dicho período monzónico (M), hemos propuesto tres índices para cada localidad L que tengan en cuenta la contribución de la precipitación media mensual en dicho período M . Denominamos SOI_{M_L} , ONI_{M_L} y MEI_{M_L} a dichos índices, que se construyen con los índices mensuales SOI, ONI y MEI respectivamente.

Artículo en edición

Artículo en edición

$$SOI_M_L = \sum_j c_j SOI_j \quad ; \quad c_j = \frac{PM_j}{PM_{OA}} \quad (3)$$

$$ONI_M_L = \sum_j c_j ONI_j \quad (4)$$

$$MEI_M_L = \sum_j c_j MEI_j \quad (5)$$

SOI_j : Índice SOI del mes j

ONI_j : Índice ONI del mes j

MEI_j : Índice MEI del mes j

c_j : Coeficiente de ponderación del mes j, con $j=1\dots 7$ cubriendo los meses de Octubre a Abril

PM_j : Precipitación media climática del mes j en la localidad analizada

PM_{OA} : Precipitación media climática del período O-A en la localidad analizada

Los coeficientes de peso mensuales para cada localidad se obtuvieron con datos pluviométricos de las estaciones estudiadas, para el período disponible 1935/36 a 2015/16 a fin de lograr el máximo de estabilidad en dichos coeficientes.

Al analizar la relación entre el ENSO y la precipitación es importante tener en cuenta el cambio en el régimen de esta para poder hacer las comparaciones, ya que las posibles anomalías deben expresarse con relación a un valor medio. Por ello se consideraron sub-muestras con los períodos antes y a partir de la TCP. Se efectuaron, para las seis estaciones de la región NOA, ajustes regresivos polinómicos entre la precipitación O-A y los índices ENSO ponderados obtenidos para cada localidad. Los ajustes se hicieron para las sub-muestras mencionadas. De este modo se puede apreciar, para la región NOA en su conjunto, el impacto de dicha transición en la precipitación del período monzónico.

En la sección 3 demostramos que solo en la Puna existe una asociación relevante entre la precipitación y el ENSO, por lo cual hemos restringido los análisis separando por fases del fenómeno ENSO a las dos localidades altiplánicas estudiadas.

Se analizaron separadamente para Abra Pampa y La Quiaca los datos de los Bloques 1 y 2, considerando de aquí en adelante que el Bloque 2 comienza en el semestre cálido de la TCP (1976/77). Asimismo se obtuvieron las curvas de regresión (polinomios de orden 2) y los coeficientes de determinación al relacionar la precipitación O-A en Abra Pampa y La Quiaca con los índices MEI_M , SOI_M y ONI_M de cada localidad. Se efectuaron ajustes regresivos con su banda de predicción de 90%, para las series completas (1950/51 – 2015/16) y los períodos 1950/51 – 1975/76, 1976/77 – 2015/16 y 1996/97 – 2015/16. De este modo se analizaron los cambios en los ajustes funcionales en relación a la TCP y también los porcentajes de variabilidad de la precipitación explicada por dichos índices para los últimos 40 y 20 años.

Además, a partir de las sub-series de precipitación acumulada O-A de La Quiaca y Abra Pampa de los períodos antes y a partir de la TCP (Bloques 1 y 2) se construyeron muestras según fase Neutra, Niña o Niño (en adelante NE, NA y NO respectivamente), discriminadas según el criterio ONI, el cual mostró mayor asociación con la precipitación en las seis localidades del NOA estudiadas. La clasificación por fases adoptada, basada en este índice, se explica en la sección siguiente.

2.6. Determinación de fases del ENSO para el período monzónico octubre-abril.

A fin de enfocarnos en la Puna Argentina, promediamos en forma ponderada los coeficientes para La Quiaca y Abra Pampa, con doble peso para esta última localidad por ser más representativa del régimen pluviométrico en esta región según se explica en la sección 3: Resultados. De este modo obtuvimos, para los siete meses del período, los siguientes valores porcentuales de los coeficientes comenzando por octubre: 2,6 ; 7,1 ; 20,5 ; 28,0 ; 24,5 ; 14,8 ; 2,5. El mes de mayor contribución es enero, seguido por febrero, diciembre, marzo, noviembre, octubre y abril, con pesos casi despreciables de

Artículo en edición

estos dos últimos meses. La contribución a la precipitación registró el mismo orden jerárquico de los meses en las restantes cuatro localidades estudiadas.

Se tuvieron en cuenta estos pesos relativos para clasificar los períodos O-A como de fase cálida, fría o neutra, ya que queremos que la clasificación refleje la intensidad del régimen monzónico en el período O-A y asociamos dicha intensidad con la precipitación.

Por otra parte, diversos estudiosos del fenómeno ENSO han adoptado el valor absoluto 0,5 como umbral de la anomalía de temperatura de la superficie del mar en la región Niño 3.4 para decidir si ese mes en particular es NA o NO (Trenberth, 1997; Trenberth y Caron, 2000; Trenberth y Stepaniak, 2001; Trenberth et al, 2007). En consonancia con ello, ponemos esta condición para el índice ONI en el mes central del verano, enero. Para los meses contiguos a enero disminuimos ligeramente la exigencia, pero pedimos que la suma de los índices de diciembre a febrero sea igual o mayor que 1,7 en valor absoluto, de modo de asegurarnos que se trata de un verano NA o NO. Para noviembre y marzo disminuimos aún más las exigencias, dado que su contribución a la precipitación O-A es notablemente más baja que la de los tres meses de verano. Para noviembre pedimos que su valor sea tal que el acumulado de noviembre a febrero sea igual o mayor que 1,9. Para marzo, puesto que su precipitación media es casi el doble que la de noviembre, exigimos que su índice ONI sea tal que el acumulado de diciembre a marzo sea igual o mayor que 2,0, y admitimos que dicho valor sea igual a 1,9 solo si el índice de marzo es 0,2. No impusimos condiciones a la precipitación de octubre y abril por tener poco peso en el total O-A. De acuerdo con estas consideraciones, desarrollamos a continuación la clasificación según el criterio ONI.

Notamos con las tres letras iniciales de cada mes al índice ONI correspondiente a dicho mes.

Adoptamos el siguiente criterio para clasificar, según el índice mensual ONI, los períodos Octubre-Abril en fase NE, NA o NO. Notamos con la letra inicial de cada mes al índice ONI correspondiente a dicho mes.

Fase NO si se cumple que:

$$ENE \geq 0,5 \quad ; \quad DIC \geq 0,4 \quad ; \quad FEB \geq 0,4$$

Artículo en edición

$$DIC + ENE + FEB \geq 1,7$$

$$NOV \geq 0,2 \quad si \quad DIC + ENE + FEB = 1,7$$

$$NOV \geq 0,1 \quad si \quad DIC + ENE + FEB = 1,8$$

En las dos inecuaciones precedentes, la igualdad en el índice ONI acumulado de diciembre a febrero se usa debido a que la precisión de los datos disponibles es de un decimal, por lo que tal suma no puede tomar valores intermedios.

$$NOV \geq 0 \quad si \quad DIC + ENE + FEB \geq 1,9$$

$$MAR \geq 0,2 \quad si \quad 1,7 \leq DIC + ENE + FEB \leq 1,8$$

$$MAR \geq 0,1 \quad si \quad 1,9 \leq DIC + ENE + FEB \leq 2,0$$

$$MAR \geq 0 \quad si \quad DIC + ENE + FEB \geq 2,1$$

Se adoptó el criterio especular (valores negativos) para la fase NA. Se asignó la fase NE a los restantes períodos O-A que no resultaron categorizados como NO o NA.

3. RESULTADOS

3.1. Saltos climáticos de la precipitación, significancia y permanencia de los cambios hallados.

3.1.1. Detección de saltos climáticos en la región NOA.

Se analizaron las series del índice de Yamamoto sobre el período 1960/1961 a 1990/1991 para las seis localidades estudiadas. Los resultados se muestran en las Figuras 2a y 2b.

FIGURA 2a

FIGURA 2b

Artículo en edición

El índice de Yamamoto mostró valores mayores que la unidad en cinco de las seis estaciones en la década del 70', con máximos en 1970/71 en Salta, 1970/71 en Abra Pampa (1971/72 si consideramos solo la serie de datos de la Estación de Ferrocarril), 1971/72 en Catamarca, 1972/73 en La Rioja, y 1976/77 en La Quiaca. Concluimos que hubo sendos saltos climáticos en estas cinco localidades.

Los saltos encontrados están en armonía con la transición climática del Pacífico de 1976/77. El adelanto observado en el salto en estas localidades con respecto a la TCP también se observó en tres localidades del centro-oeste de Argentina (Russian et al., 2015); estos autores hallaron saltos climáticos en la precipitación a comienzo de la década de 1970 en las localidades de General Pico, Victorica y Qehué (provincia de La Pampa). Dicho adelantamiento podría estar asociado con el comienzo de la fase de ascenso de la PDO en el año 1971 -aunque siguió en su fase fría hasta 1976- (Jacques-Coper y Garreaud, 2015).

En la serie de Tucumán no se observa salto climático según el criterio de Yamamoto en el período analizado. Sin embargo, Minetti y Vargas (1997) informaron un salto en 1956 que está en armonía con lo ocurrido en la región húmeda más al este. En consecuencia podemos concluir que los saltos climáticos en el NOA en la década de 1970 quedaron restringidos a la región semiárida.

3.1.2. Significancia estadística de los cambios hallados a partir de los saltos climáticos.

Para las cinco localidades estudiadas de la región NOA que acusan saltos climáticos en el período analizado, se dividió la serie de datos 1935/36 – 2015/16 en dos sub-series que denominamos Bloques 1 y 2 (antes y a partir del salto climático correspondiente). Se obtuvieron los siguientes descriptores estadísticos de la precipitación acumulada O-A: media, CV, mínimo y máximo y la razón de la media del Bloque 2 con respecto al Bloque 1 (Tabla II).

TABLA II

Asimismo se efectuaron sendos test de Tukey. En Abra Pampa (en la Puna semiárida) y en Salta, Catamarca y La Rioja (al sur de la Puna) el test rechaza la hipótesis nula de pertenencia a la misma población estadística, evidenciando un cambio (aumento) significativo en la precipitación. Este resultado ya había sido obtenido para Abra Pampa con una serie temporal más corta (Maggi et al., 2015). En La Quiaca el test no rechaza la hipótesis nula (Tabla II).

Al comparar la precipitación entre bloques para Abra Pampa y La Quiaca, vemos que el Bloque 2 presenta en ambas localidades una media superior. En el caso de La Quiaca los cambios acompañan lo observado en Abra Pampa pero fueron de menor magnitud, razón por la cual el test de Tukey no rechaza la hipótesis de pertenencia a la misma población cuando el nivel de exigencia es alto ($\alpha = 0.05$) (Tabla II). A pesar de este resultado, es improbable que el cambio en la media de las poblaciones no haya sucedido también en La Quiaca, pues la distancia entre estas localidades es de solo 84 km, ambas están en la Puna a casi igual altitud y con una diferencia mínima en su longitud geográfica. Además, el test de Yamamoto indica claramente saltos climáticos en ambas localidades. Por ello, hemos efectuado el mismo test para La Quiaca con todos los datos disponibles (desde 1908), tomando como Bloque 1 el período 1908/09 – 1975/76. En este caso el test de Tukey rechaza la hipótesis de pertenencia a la misma población estadística y muestra al Bloque 2 con una precipitación media significativamente mayor (Tabla II). Este resultado es coherente con lo observado en las restantes localidades.

El aumento relativamente menor de la precipitación en La Quiaca en comparación con Abra Pampa a partir de la TCP, puede deberse a la ubicación particular de La Quiaca; esto se discute más adelante.

Podemos inferir, apoyados en los resultados que se muestran en la Tabla II, que posteriormente a la TCP hubo un cambio significativo en la precipitación en la sub-región semiárida del NOA que incluye a la Puna, manifestado en sus valores medios y variabilidades.

3.1.3. Tendencias recientes de la precipitación en la región NOA.

Artículo en edición

En la Tabla III se muestran, para las seis localidades estudiadas, las medias de precipitación O-A en los cuatro períodos denominados P1 (antes de la TCP), P2 (a partir de la TCP), P3 (1976/77 –1995/96) y P4 (1996/97 – 2015/16), y las razones entre los montos de estos períodos, P2/P1, P4/P3 y P4/P1 denominadas respectivamente P21, P43 y P41. Se indica en cada caso el tamaño de la muestra (N).

TABLA III

Las razones P21 muestran que la precipitación aumentó sensiblemente a partir de la TCP en las seis localidades de la región NOA.

Las razones P43 muestran tendencias decrecientes de la precipitación en los últimos 20 años –con respecto a los 20 años precedentes- en las seis localidades de la región NOA. Vemos en la Tabla III que en Abra Pampa y La Quiaca las disminuciones son similares y aproximadamente del 10%, mientras que en La Rioja, Salta y Tucumán se registraron disminuciones mucho menores (entre 2% y 4%), y en y Catamarca se observa una disminución mayor (15%). Estos resultados actualizan lo hallado por Minetti et al. (2003), quienes con series de precipitación del periodo 1931/32 – 1998/99 reportaron tendencias decrecientes en La Quiaca y Catamarca en la década de 1990, y tendencias crecientes permanentes en las localidades de Salta, Tucumán y La Rioja. Nuestros resultados muestran que estas tres localidades acusaron un descenso más tardío y menos importante.

Las razones P41 indican que, a pesar de las disminuciones observadas en el período P4, la precipitación en este período sigue siendo mayor que en el período P1 (antes de la TCP) en todo el NOA.

Es de destacar que para Catamarca, si se considera la precipitación del período julio-junio, las razones P21, P43 y P41 aumentan de 1,13 a 1,14, de 0,85 a 0,87 y de 1,04 a 1,06 respectivamente. Ello se debe al alargamiento del lapso de lluvias a partir de la TCP, con más precipitaciones fuera del período O-A.

3.2. Características de los índices SOI_O-A, ONI_O-A Y MEI_O-A y asociación entre ellos.

Para los 66 casos analizados (períodos O-A) los tres índices presentan distribuciones asimétricas negativas, con los estadísticos que se detallan en la Tabla IV.

TABLA IV

En la Figura 3 se muestran los ajustes regresivos no lineales (polinomios de orden 2) entre los índices representativos del semestre cálido SOI_O-A, ONI_O-A y MEI_O-A tomados de a pares, los valores puntuales obtenidos y los coeficientes de determinación respectivos (R^2) a fin de conocer el grado de asociación entre ellos. Se presentan solo las regresiones polinómicas, ya que en todos los casos estas mostraron mejores ajustes que las funciones lineales, evidenciados por mayor R^2 y menor término independiente en la ecuación del modelo polinomial propuesto, con respecto al modelo lineal correspondiente.

FIGURA 3

Se verifica que los ajustes son todos muy buenos, según los valores de R^2 obtenidos, entre 0.83 y 0.97. El índice MEI_O-A es el que mejor ajusta con los otros dos, tanto para la serie completa como para los períodos antes y a partir de la transición climática. Esto era previsible, ya que está construido con variables atmosféricas -lo que explica el mejor ajuste con el SOI_O-A- y con la temperatura de la superficie del mar, lo cual incide en el mejor ajuste con el ONI_O-A. También se observa que este último índice ajusta mejor con el MEI_O-A en comparación con el SOI_O-A.

Se observa asimismo que al separar la serie completa en dos períodos, antes de la TCP (1950/51 – 1975/76) y a partir de esta (1976/77 - 2015 /16) el ajuste es mejor en ambos períodos que para la serie completa, en las tres combinaciones posibles de índices. En particular, para los dos índices mejor correlacionados entre sí (MEI_O-A y ONI_O-A) el coeficiente de determinación pasa de 0.91 en el período completo a 0.97 y 0.96 antes y a partir de la TCP. Esto es clara evidencia de que la transición climática causó un cambio en los procesos atmosféricos y oceánicos del Pacífico, lo cual se ve expresado

en la modificación de las relaciones funcionales entre los índices; como consecuencia, al tomar la serie completa la correlación disminuye.

En consonancia con el hecho comprobado de que a partir de la TCP ocurren eventos NO más intensos, se verifica que para el período de 66 años estudiado los índices MEI_O-A y ONI_O-A son mayores que 15 y 12 respectivamente (correspondientes a fases NO muy intensas) únicamente en tres casos pertenecientes a los últimos 34 años: 1982/83, 1997/98 y 2015/16.

3.3. Los índices SOI_M, ONI_M y MEI_M. Relación con la precipitación.

3.3.1. Análisis para la región NOA.

En la Tabla V se muestran los porcentajes mensuales de la precipitación total del período O-A, obtenidos para las seis localidades estudiadas. Con ellos se obtuvieron los coeficientes de peso mensuales que se usaron para obtener los índices SOI_M, ONI_M y MEI_M específicos para cada localidad y ya definidos (ecuaciones 3, 4 y 5).

TABLA V

Se efectuaron, para dichas localidades, ajustes regresivos no lineales (polinómicos de orden 2) entre la precipitación O-A y los dos índices ENSO ponderados que muestran en general un mejor ajuste (según el R^2) con la precipitación: ONI_M y MEI_M, ambos obtenidos para cada localidad. Las regresiones se hicieron sobre dos períodos: antes y a partir de la TCP. En la Tabla VI se muestran los valores de R^2 obtenidos.

TABLA VI

Se puede apreciar que solo en La Quiaca y Abra Pampa los índices ONI_M y MEI_M explican porcentajes relevantes de la variabilidad de la precipitación estival, evidenciando que el fenómeno ENSO tiene un impacto importante en la precipitación O-A de la Puna argentina, si bien no es el único proceso que influye en su variabilidad. Es también de destacar que en Abra Pampa el R^2 es relativamente alto en los dos bloques para ambos índices (entre 0,26 y 0,45), mientras que en La Quiaca el R^2 es

comparativamente menor, especialmente en el Bloque 1 en el que es igual a 0,15 para el índice ONI_M_LQ y 0,18 para el MEI_M_LQ.

Por el contrario, las localidades fuera de la Puna responden muy débilmente a las fases del fenómeno ENSO, salvo Tucumán antes de la TCP donde con el índice ONI_M_TU se obtuvo un R^2 igual a 0.15. A partir de la TCP el grado de asociación (medido con el R^2) entre la precipitación en estas localidades y los índices ENSO es irrelevante en casi todos los casos.

3.3.2. Asociación entre la precipitación en la Puna y los índices ENSO ponderados.

Se efectuó un análisis más profundo con las series de las dos localidades puneñas. Se hicieron ajustes regresivos polinómicos de segundo grado en todos los casos, con sus bandas de predicción de 90%, para las series de precipitación acumulada O-A en La Quiaca (LQ) y Abra Pampa (AP) versus los índices SOI_M, ONI_M y MEI_M específicos para cada localidad, para el período 1950/51 – 2015/16. Se indica en cada caso el coeficiente de determinación.

Hemos preferido usar modelos polinomiales en vez de lineales porque las relaciones funcionales son evidentemente no lineales. Si se promedian los valores de precipitación por franjas de los índices SOI_M, ONI_M y MEI_M, se observa que generalmente los máximos se ubican en las franjas intermedias de dichos índices, las cuales se corresponden con la fase NE.

En la Figura 4 se muestran las regresiones obtenidas para el período completo (1950/51 – 2015/16). Se verifica que la precipitación de AP ajusta mejor que la de LQ para los índices SOI_M y ONI_M; idéntico resultado se ve al promediar los R^2 de los tres índices. Los ajustes evidencian una relación funcional débil.

FIGURA 4

En las Figuras 5 y 6 se muestran, para La Quiaca y Abra Pampa respectivamente, las regresiones hechas en forma similar para los períodos 1950/51 – 1975/76 y 1975/77 - 2015/16 (antes y a partir de la TCP).

FIGURA 5

FIGURA 6

Se aprecia claramente que las relaciones funcionales cambian con la TCP, y como consecuencia de ello el R^2 para el período 1950/51 – 2015/16 (Figura 4) es menor que para el último período en ambas localidades; esto evidencia el mejor ajuste funcional a partir de la transición climática. En Abra Pampa cambia incluso la forma de la función regresiva, pues en fase NE las lluvias se incrementan notablemente a partir de la TCP y en término medio son mayores que las que ocurren en fase NA. Este aumento también ocurre en La Quiaca aunque no es tan pronunciado.

En la Figura 7 se muestra un análisis similar en La Quiaca y Abra Pampa para el período 1996/97 – 2015/16.

FIGURA 7

Los coeficientes R^2 indican, para los ajustes según los tres índices usados, que la variabilidad de la precipitación O-A explicada por estos es mucho mayor en los últimos 20 años, al comparar con las Figuras 6 y 7. Para LQ versus los índices ONI_M_LQ y MEI_M_LQ, los valores respectivos de R^2 son iguales a 0,23 y 0,22 en el período 1976/77 – 2015/16 y pasan a 0,36 y 0,33 en el período 1996/97 – 2015/16. La misma comparación para AP indica que los coeficientes R^2 aumentan de 0,45 a 0,67 y de 0,44 a 0,61. Vemos que se profundiza el mayor ajuste de la precipitación con el índice ONI_M en ambas localidades.

También se nota que la tendencia a ocurrir mayor precipitación en fase NE que en fase NA se ha mantenido.

Para AP los ajustes siguen siendo muy superiores que para LQ. Esto indica que la precipitación en el interior de la Puna Argentina (Puna semiárida, representada por Abra Pampa) está más determinada por el fenómeno ENSO que la precipitación en LQ. Una explicación posible de este comportamiento diferenciado se trata en la sección 3.4.2.3, en que se discuten los mecanismos que conducen a ocurrencia de precipitación en LQ.

Estos resultados nos llevan a usar el índice ONI_M de aquí en adelante, y a efectuar la clasificación de los períodos O-A en fases NA, NE y NO según el criterio presentado en la sección 2.6, el cual está basado en el índice mensual ONI.

3.4. Variabilidad de la precipitación en la Puna. Relación con la TCP y el ENSO.

3.4.1. Análisis en relación a la TCP y a las fases del fenómeno ENSO.

Se obtuvieron descriptores estadísticos de la precipitación acumulada Octubre-Abril en La Quiaca y Abra Pampa, agrupada por fase NE, NA y NO. Las sub-series analizadas, de distinta longitud, conforman el Bloque 1 (26 veranos antes de la TCP) y el Bloque 2 (40 veranos a partir de la TCP). Los resultados se exhiben en la Tabla VII.

TABLA VII

Al separar, para cada bloque y localidad, por fases NE, NO y NA, vemos que para todas ellas la media es superior en el Bloque 2.

En las fases NO se observan menores valores en la precipitación media con respecto a las fases NA y NE, en ambas localidades, antes y a partir de la TCP; las diferencias relativas al comparar los montos en fase NO con los hallados en las fases NA y NE son en general importantes. Este resultado está en armonía con lo hallado por otros autores para otras subregiones del Altiplano, que informan menor precipitación en el semestre cálido durante los eventos NO (Aceituno y Montecinos, 1993; Vuille, 1999; Vuille et al., 2000; Garreaud y Aceituno, 2001; Ronchail y Gallaire, 2006). Maggi et al. (2010) encontraron una disminución de la extensión de la superficie de la laguna de Pozuelos, situada entre Abra Pampa y La Quiaca, durante los veranos en fase NO ocurridos en el período de 1978 a 2003. Dicha superficie funciona como un metadato de la precipitación.

La precipitación media de La Quiaca en fase NE es levemente mayor que en fase NA. En cambio en Abra Pampa, en el Bloque 1 la precipitación media en fase NE es menor que en fase NA, revirtiéndose la relación en el Bloque 2. Ello se debe a un aumento relativo de la precipitación mucho mayor en la fase NE.

En La Quiaca la fase NE aumenta su variabilidad –medida por el CV- al pasar del Bloque 1 al 2. Por el contrario, en Abra Pampa la variabilidad en esta fase disminuye en forma importante al pasar del Bloque 1 al 2. En la sección 3.4.2.3 se presenta una hipótesis sobre los mecanismos que generan precipitación en La Quiaca, que podría explicar esta diferencia llamativa entre ambas localidades, las cuales son muy cercanas y están a similar altitud.

Además, se observa en la Tabla VII que al discriminar por fases del ENSO, en ambas localidades a partir de la TCP (bloque 2) se reduce sensiblemente la variabilidad de la precipitación O-A en los eventos NA. Asimismo a partir de la TCP aumenta la variabilidad de la precipitación en las fases NO.

Los casos en fase NA y NO fueron solo siete en el Bloque 1 debido a la ya mencionada corta longitud de la sub-serie que lo conforma. Los resultados para estos casos deben tomarse solo como provisionarios, y figuran en la Tabla VII en negrita a fin de resaltarlos.

Si promediamos los valores de precipitación O-A de AP y LQ, vemos que en esta nueva serie los máximos ocurren mayoritariamente en fase NE.

3.4.2. Los extremos de precipitación en la Puna, su relación con los eventos ENSO y su ubicación en el tiempo.

3.4.2.1. Análisis para Abra Pampa.

Para el período 1950/1951 a 2015/2016 se efectuó la clasificación por fases NE, NA y NO de los períodos monzónicos O-A. Los resultados para Abra Pampa se muestran en la Tabla VIII, con los casos ordenados según el índice ONI_M_AP. Hacemos notar que al semestre cálido de la TCP (1976/77) los índices SOI_M_AP (con valor 0,10) y MEI_M_AP (con valor 0,43) lo clasifican como NE, mientras que el índice ONI_M_AP (con valor 0,64) está de acuerdo con su ubicación en fase NO (ver Tabla VIII). Algo similar ocurre con La Quiaca, según se aprecia en las Figuras 4 a 6.. Estos resultados están de acuerdo con lo informado por Yuchechen et al (2007), quienes al analizar la evolución de la superficie de 500 hPa sobre Sudamérica hallaron que durante la TCP el cambio en el patrón de circulación atmosférica ocurrió con cierto retardo –en febrero de 1977- con respecto al calentamiento de la superficie del Océano Pacífico en la región Niño 3.4.

TABLA VIII

Vemos que valores absolutos de este índice iguales a 0,57 separan eficientemente y con muy pocas excepciones los períodos monzónicos, o casos, en fase NO, NE y NA, lo

Artículo en edición

cual se verifica también para LQ. Los 18 casos con dicho índice por debajo de -0,57 son en fase NA, y por encima de 0,57 los 16 casos registrados ocurrieron en fase NO.

En la serie total disponible 1935/36 a 2015/16 de Abra Pampa se verifica que los 16 máximos de precipitación O-A se ubican después del salto climático de 1970/71; se resaltan en color celeste en la Tabla VIII. El menor de ellos es 375 mm en 2012/13, que se iguala en 1953/54, pero en el primer período nombrado la precipitación durante julio a junio supera al segundo por 2,8 mm.

Se aprecia además en esta Tabla que de los montos mayores de precipitación, 11 sobre 12 y 14 sobre 16 de ellos se registraron a partir de la TCP. Este resultado es coincidente con lo observado por Agosta y Compagnucci (2008) en la precipitación de la región centro-oeste de Argentina, al sur de La Puna, donde los ciclos alternantes húmedo/seco de aproximadamente 9 años de duración cada uno finalizan tras la transición climática de 1976/77, y como resultado se tiene un evento húmedo prolongado durante 30 años, que comenzó en 1973 según estos autores.

Los 9 valores mayores (en celeste y **negrita**) se ubican a partir de dicha transición. De estos, 5 ocurrieron en fase NE, 2 en NA y 2 en NO. Se ve claramente la predominancia de la fase NE en los máximos de precipitación O-A.

También se muestra en la Tabla VIII que de los 9 valores más bajos, 6 son en fase NO; estos resultados están de acuerdo con lo esperado, ya que en fase NO la convección en la Puna está inhibida debido a la intensificación de la Alta de Bolivia.

Asimismo, se verifica que a partir de la TCP ocurren los eventos NO estivales más intensos, como lo indica el ordenamiento según el índice ONI_M_AP en la Tabla VIII: 7 de los 9 máximos extremos. El índice ONI_M_LQ en la Tabla IX (para La Quiaca) arroja igual resultado.

En el período monzónico 2015/16 –con máximos en los índices ONI_M_AP y ONI_M_LQ que señalan a la fase NO más intensa- se verifican los mínimos de precipitación de ambas series, con 85 mm y 150 mm respectivamente (ver Tablas VIII y IX). En consonancia con esto, al visitar la zona en marzo de 2016 verificamos que la laguna de Pozuelos tenía un volumen muy bajo de agua.

3.4.2.2. Análisis para La Quiaca.

Se repitieron las variables de la sección anterior para La Quiaca (Tabla IX) en el período 1950/51 - 2015/2016. Los casos están ordenados en forma creciente según el índice ONI_M_LQ.

TABLA IX

En la serie 1935/1936 a 2015/2016 de esta localidad se verifica que los máximos de precipitación O-A se ubican en general a partir del salto climático coincidente con la TCP, y los 6 mayores pertenecen a dicho período, que se incluye en esta Tabla.

De estos 6 máximos, se observa que 3 de ellos ocurrieron en fase NE, 2 en NO y 1 en NA. De los 15 mayores valores ocurridos en el período 1950/51 – 2015/16, 11 se ubican después de la TCP; según el criterio SOI 7 de ellos ocurrieron en fase NE, 6 en NA y 2 en NO.

En la Tabla IX se tienen 66 períodos O-A (1950/51 – 2015/16). De los 20 casos con menor precipitación, 14 de ellos se registraron antes de la TCP (el 53,8% de los 26 casos de la sub-muestra). Los 6 casos restantes se ubican a partir de la TCP, es decir, el 15% sobre 40 casos.

Si restringimos el análisis a los 10 períodos O-A con menor precipitación, 5 de ellos son anteriores y 5 posteriores a la transición climática, lo que contrasta con lo observado en Abra Pampa (7 antes de la TCP y 3 a partir de la TCP). Este comportamiento no esperado podría estar relacionado con la ubicación de La Quiaca, como explicamos más adelante.

La Tabla X muestra las frecuencias de mínimos y máximos de precipitación O-A y permite comparar lo ocurrido en La Quiaca y Abra Pampa.

TABLA X

En La Quiaca, de los cinco períodos O-A con menor precipitación ocurrieron solo 3 en NO y 2 en NA. El contraste con Abra Pampa es llamativo, ya que en esta los 5 casos se

dieron en fase NO, lo que está en armonía con lo reportado por otros autores en regiones del Altiplano en Bolivia y Chile (Aceituno y Montecinos, 1993; Vuille, 1999; Vuille et al., 2000; Garreaud y Aceituno, 2001; Ronchail y Gallaire, 2006).

De los 10 períodos O-A con menor precipitación, en La Quiaca 3 son en fase NA, mientras que en Abra Pampa ninguno ocurrió en fase NA. Las frecuencias en fase NE son llamativamente menores en La Quiaca que en Abra Pampa.

Al analizar de los 20 mínimos estas diferencias entre las dos localidades se acentúan. En fase NA ocurrieron 5 casos en La Quiaca y solo 1 en Abra Pampa.

Al comparar en estas dos localidades las frecuencias de máximos de precipitación O-A (5, 10 y 20 casos), no hallamos diferencias relevantes (Tabla X).

3.4.2.3. Hipótesis sobre la singularidad de la precipitación en La Quiaca.

En las secciones 3.1, 3.3 y 3.4 algunos resultados revelaron características de la precipitación en La Quiaca no esperadas, y distintas a las de la localidad altiplánica vecina Abra Pampa.

Se observa asimismo en la serie de La Quiaca, según se deduce fácilmente de la Tabla V, una mayor proporción de precipitación acumulada en primavera y principios del verano (octubre, noviembre y diciembre) en comparación con Abra Pampa: 35,1% contra 27,7%. El porcentaje en La Quiaca es similar a los registrados en localidades de la región NOA de menor altitud y más húmedas fuera de la Puna, tales como Tucumán (35,2%) y Catamarca (35,0%) (Tabla V). Este resultado no se condice con la explicación de la dinámica atmosférica que dieron Nogués-Paegle et al. (2002). Estos autores encontraron que la zona de convergencia del Atlántico Sur (SACZ) evoluciona en espacio y tiempo durante el monzón sudamericano. En primavera y diciembre, la SACZ está ubicada en su posición más al este, lo que conduce a baja ocurrencia de precipitación en el Altiplano. A partir de enero hay un corrimiento de la SACZ hacia el oeste y la precipitación aumenta sobre el Altiplano, en asociación con la entrada de aire húmedo e inestable en niveles bajos a lo largo del flanco este de los Andes (Nogués-

Artículo en edición

Paegle et al., 2002). Según este análisis, cabe esperar un aumento importante de la precipitación al pasar de diciembre a enero, lo que se verifica más marcadamente en Abra Pampa que en La Quiaca según se observa en la Tabla V.

Basados sobre los resultados obtenidos en esta sección y la anterior, presentamos la hipótesis de que la precipitación en La Quiaca tiene una componente adicional a la producida por el mecanismo típico que conduce a lluvias en la Puna, tal como proponemos a continuación.

La Figura 1b muestra el relieve del área de estudio, elaborado con datos altimétricos disponibles en el sitio WEB de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA): <https://urs.earthdata.nasa.gov/>. Allí se ve que La Quiaca es muy cercana a un valle extenso que se abre hacia el NNE de la localidad, distante a unos 5 km. Desde esa dirección puede eventualmente irrumpir por el valle aire cálido y húmedo que provoque lluvias mediante un proceso distinto al mecanismo clásico de precipitación en la Puna Argentina, caracterizado por advección desde el este y posterior convección en presencia de la Alta de Bolivia debilitada, lo cual no ocurre en fase NO. La baja proporción de precipitaciones mínimas en fase NO indicaría que en esta fase, en la cual el flujo norte-sur en capas bajas en el flanco oriental de la cordillera de los Andes está intensificado desde el comienzo de la primavera, hay días en que se dan condiciones para el desencadenamiento de la convección debido al ascenso forzado de aire cálido y húmedo en el extremo sur de dicho valle, casi sobre La Quiaca. Esto daría lugar, cuando la Alta de Bolivia no es tan intensa, a la ocurrencia de tormentas aisladas y lluvias de origen convectivo sobre esta localidad, que no se dan al interior de la Puna. Esta hipótesis, basada solamente en la precipitación observada en La Quiaca y Abra Pampa, debería ser confirmada con estudios de casos de precipitación en La Quiaca en fase NO, basados en la dinámica de mesoescala del movimiento atmosférico.

Por otra parte, al comparar para el período 1950/51 - 2015/16 las series de precipitación de La Quiaca antes y a partir del salto climático mediante el test de Tukey (Tabla II), no se pudo descartar la hipótesis nula de que ambas muestras estadísticas pertenecen a la misma población, contrariamente al cambio de régimen observado en Abra Pampa, Salta, Catamarca y La Rioja.

Debido a estos resultados estadísticos, consideramos que la precipitación en la localidad de Abra Pampa es más representativa de lo que ocurre en la Puna Argentina, en comparación con los datos de La Quiaca.

4. CONCLUSIONES

Hemos verificado la ocurrencia de saltos climáticos en la precipitación de las cinco localidades estudiadas en la sub-región semiárida del NOA –incluido el Altiplano Argentino-, en la década de 1970. No hay reportes a este respecto en el resto del Altiplano situado en Bolivia y Chile. Los saltos encontrados están en armonía con la TCP de 1976/77.

Se hallaron tendencias decrecientes de la precipitación a partir de la década de 1990 en toda la región NOA, más pronunciadas en La Quiaca, Abra Pampa y Catamarca. Sin embargo, en el período 1996/97 - 2015/16 la precipitación media continúa siendo mayor que la del período 1935/36 - 1975/76 (antes de la TCP) en toda la región NOA.

Se diseñaron índices ENSO representativos del semestre cálido: SOI_O-A, ONI_O-A y MEI_O-A. El grado de asociación entre ellos resultó muy alto. El índice MEI_O-A, como cabía esperar, es el que mejor ajusta con los otros dos.

Encontramos clara evidencia de que la TCP causó un cambio en los procesos atmosféricos y oceánicos que inciden en la sub-región semiárida del NOA, lo cual se ve expresado en la modificación de las relaciones funcionales entre dichos índices al considerar separadamente los períodos antes y a partir de la TCP.

En consonancia con el hecho comprobado de que a partir de la TCP ocurren eventos NO más intensos, hemos verificado que esto también se cumple al considerar los semestres cálidos O-A.

Se ha propuesto y aplicado un criterio para clasificar, a partir de los índices mensuales ONI, los períodos Octubre-Abril en fase NE, NA o NO, con condiciones especulares para clasificar como NA o NO.

Artículo en edición

Hemos analizado la precipitación O-A en La Quiaca y Abra Pampa separando por bloques 1 y 2 (antes y a partir de la TCP) y por fases NE, NO y NA. Las conclusiones deben tomarse como preliminares, dado el pequeño número de casos disponibles, en especial antes de la TCP. Verificamos que en ambas localidades, para las tres fases en el Bloque 2 las medias aumentan y se reduce sensiblemente la variabilidad de la precipitación O-A en los eventos NA. En el Bloque 2, dicha variabilidad es mayor en la fase NO que en NA y NE.

En ambas localidades, a pesar de que la mayoría de los máximos de precipitación ocurren en fase NE, la media de la precipitación en esta fase es similar a la de la fase NA, a causa de que esta última presenta menor variabilidad.

En Abra Pampa, localidad representativa de la Puna Semiárida, la variabilidad en fase NE disminuye en forma importante al pasar del Bloque 1 al 2.

Hemos propuesto la hipótesis de un mecanismo alternativo para explicar la ocurrencia de precipitación en La Quiaca en fase NO, distinto al mecanismo típico que conduce a lluvias en la Puna. El mismo se apoya en la existencia de un valle extenso que se abre hacia el NNE de esta localidad que permitiría el ingreso de aire cálido y húmedo proveniente de la región amazónica. Esta hipótesis debería ser confirmada con estudios de casos de precipitación en La Quiaca en fase NO, basados en la dinámica de mesoescala del movimiento atmosférico, incluso con el uso de simulaciones numéricas. Verificar este mecanismo está fuera de los objetivos de este trabajo.

Se han diseñado y aplicado tres índices representativos del período O-A –basados respectivamente en los índices mensuales SOI, ONI y MEI- ponderados con la precipitación mensual media y aplicables a cada localidad; los mismos incorporan la contribución de la precipitación media mensual local en dicho período. Hemos hallado que el índice ponderado ONI_M muestra un mejor ajuste con la precipitación que los otros dos.

Hemos constatado que solo en La Quiaca y Abra Pampa los índices ONI_M y MEI_M explican porcentajes importantes de la variabilidad de la precipitación estival, evidenciando la influencia del fenómeno ENSO, la cual es mayor a partir de la TCP; se verifica que la precipitación de AP está más relacionada al signo e intensidad del

fenómeno ENSO que la de LQ, y esta mayor dependencia se intensifica a partir de la TCP. Asimismo, en el período 1996/97 – 2015/16 la influencia del fenómeno ENSO sobre la precipitación O-A en estas localidades altiplánicas es significativamente mayor que en el período 1976/77 – 1995/96.

Por el contrario, las localidades estudiadas fuera de la Puna no muestran una dependencia relevante de la precipitación O-A con las fases del fenómeno ENSO, especialmente a partir de la TCP.

AGRADECIMIENTOS: Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y la Universidad de Buenos Aires por el financiamiento de la investigación, la que fue también hecha con fondos del Proyecto UBACyT 20020130200156BA. A los revisores del artículo, quienes contribuyeron al mejoramiento del mismo con sus acertadas observaciones y sugerencias. A las instituciones SMN, INTA, IGN, Laboratorio Climatológico Sudamericano, NOAA y NASA por los datos aportados que hicieron posible el trabajo.

REFERENCIAS

Aceituno, P., Montecinos, A., 1993. Stability analysis of the relationship between the Southern Oscillation and rainfall in South America. Bull. Inst. Fr. Études Andines 22, 53-64.

Agosta, E.A., & Compagnucci, R.H., 2008. The 1976/77 austral summer climate transition effects on the atmospheric circulation and climate in southern South America. J. Climate, 21, 17, 4365-4383.

Ambrizzi, T., de Souza, E.B., & Pulwarty, R.S., 2004. The Hadley and Walker regional circulations and associated ENSO impacts on South American seasonal rainfall. In: The Hadley circulation: present, past and future. Springer Ed. Netherlands. págs. 203-235.

Barnston, A.G., Chelliah, M. and Goldenberg, S.B., 1997. Documentation of a highly ENSO-related SST region in the equatorial Pacific. Atmos.-Ocean, 35, 367-383.

Barrera D.F. y Basualdo A.B., 2012. La precipitación media en la cuenca del río Iruya: Análisis basado en la topografía. Revista de Geografía (San Juan). 15, 16-23.

Barros, V., Doyle, M., González, M., Camilloni, I., Bejarán, R. y Caffera, R., 2002. Climate variability over subtropical South America and the South American Monsoon: a review. Meteorologica, 27, 1 y 2, 33-57.

Cabrera, A.L., 1976. Regiones fitogeográficas argentinas. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, Tomo II Fs. 1. Ed. ACME. Bs. As. Argentina. 1-85 pp.

Compagnucci, R.H. y Agosta, E.A., 2008. La precipitación de verano en el centro-oeste de Argentina y los fenómenos interanual El Niño/Oscilación Sur (ENOS) e interdecádico "tipo" ENSO. GEOACTA 33, 107-114.

Ebbesmeyer, C.C., Cayan, D.R., McLain, D.R., Nichols, F.H., Peterson, D.H. y Redmond, K.T., 1991. 1976 step in the Pacific climate: forty environmental changes between 1968-1975 and 1977-1984. Anales, Seventh Annual Pacific Climate (PACLIM) Workshop, 10-13 Abril de 1990, Pacific Grove, California, EEUU, 115-126.

Diaz, H.F., Hoerling, M.P. y Eischeid, J.K., 2001. ENSO variability, teleconnections and climate change. Int. J. Climatol., 21, 1845-1862.

Ferreira, L., Saulo, C. y Seluchi, M.E., 2010. Características de la Depresión del Noroeste Argentino en el período 1997-2003: Criterios de selección y análisis estadístico. Meteorologica, 35, 17-28.

Garreaud, R.D., 1999. Multiscale analysis of the summertime precipitation over the central Andes. Mon. Wea. Rev., 127, 901-921.

Garreaud, R.D. y Aceituno, P., 2001. Interannual Rainfall Variability over the South American Altiplano. J. Climate, 14, 2779-2789.

Garreaud, R.D. y Seluchi, M., 2001. Pronóstico de la convección en el Altiplano Sudamericano: Empleo del modelo regional ETA/CPTEC. Meteorologica, 26, 1, 25-38.

Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R.H. y Marengo, J., 2009. *Present-day South American climate, Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 281, 3-4, 180-195.

González M. y Barros V., 1998. *The relation between tropical convection in South América and the end of the dry period in subtropical Argentina. Int. J. Climatol.*, 18, 1669-1685.

Huang, H.P., Seager, R. and Kushnir, Y., 2005. *The 1976/77 transition in precipitation over the Americas and the influence of tropical sea surface temperature. Clim. Dyn.*, 24, 7, 721-740.

Jacques-Coper, M., & Garreaud, R.D., 2015. *Characterization of the 1970s climate shift in South America. Int. J. of Climatol.* 35, 2164-2179.

Lau, K.M. y Zhou, J., 2003. *Anomalies of the South American summer monsoon associated with the 1997-1999 ENSO. Int. J. Climatol.*, 23, 529-539.

Lenters, J.D. y Cook, K.H., 1997. *On the Origin of the Bolivian High and Related Circulation Features of the South American Climate. J. Atmos. Sci.*, 54, 656-678.

Lichtenstein, E.R. 1980. *La depresión del Noroeste Argentino. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, 120 págs. <https://www.digital.bl.fcen.uba.ar>*.

Maggi, A.E., Di Ferdinando, M. y Barrera, D.F., 2015. *Influencia del fenómeno ENOS sobre la productividad vegetal en dos comunidades vegetales de la Puna Argentina. Actas del XII Congreso Nacional de Meteorología CONGREMET XII. Mar del Plata, Argentina, 26-29 de mayo de 2015.*

Maggi, A.E., Navone, S.M. y Kindgard, F.A., 2010. *Monitoreo de los cambios en el comportamiento de algunas lagunas debido a la oscilación climática utilizando imágenes satelitales en la puna jujeña. Revista SELPER. Edición especial. 2, 34-45.*

Mechoso, C.R., Robertson, A.W., Ropelewski, C.F. y Grimm, A.M., 2004. *The American Monsoon Systems. Proceedings of the 3rd international workshop on monsoons. Vol 1, págs. 2-6. Hangzhou, China.*

Artículo en edición

Meehl, G.A., Hu, A., Arblaster, J.M., Fasullo, J. y Trenberth, K.E., 2013. *Externally forced and internally generated decadal climate variability associated with the Interdecadal Pacific Oscillation. J. Climate* 26, 7298–7310.

Miller, A.J.; Cayan D.R., Barnett T.P. y Oberhuber J.M., 1994. *The 1976-77 climate shift of the Pacific Ocean. Oceanography*, 7, 996–1002.

Minetti, J.L. y Vargas, W.M., 1997. *Trends and jumps in the annual precipitation in South America, south of the 15° S. Atmósfera*, 11, 205-221.

Minetti, J.L., Vargas, W.M., Poblete, A.G., Acuña, L.R. y Casagrande, G., 2003. *Non-linear trends and low frequency oscillations in annual precipitation over Argentina and Chile, 1931-1999. Atmósfera*, 16, 119-135.

Minetti, J.L., 2005. *El Clima del Noroeste Argentino. Ed. Magna, S.M. de Tucumán. 350 págs.*

Namias, J., 1978. *Multiple causes of the North American abnormal winter 1976-77. Monthly Weather Review*, 106, 3, 279-295.

Newman, M., Alexander, M.A., Ault, T.R., Cobb, K.M., Deser, C., Di Lorenzo, E., Mantua, N.J., Miller, A.J., Minobe, S., Nakamura, H., Schneider, N., Vimont, D.J., Phillips, A., Scott, J.D. y Smith, C.A., 2016. *The Pacific decadal oscillation, revisited. J. of Climate*, 29, 12, 4399-4427.

Nogués-Paegle, J., Mechoso, C.R. y coautores, 2002. *Progress in Pan American CLIVAR Research: Understanding the South American Monsoon. Meteorológica*, 27, 3-32.

Ronchail, J., y Gallaire, R., 2006. *ENSO and rainfall along the Zongo valley (Bolivia) from the Altiplano to the Amazon basin. Int. J. Climatol.* 26, 1223-1236.

Ropelewski, C.F. y Halpert, M.S., 1987. *Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño / Southern Oscillation. Mon. Wea. Rev.*, 115, 1606-1626.

Artículo en edición

Russian, G., Agosta, E. y Compagnucci, R., 2015. Variaciones en baja frecuencia de la precipitación estacional en la región Pampa Amarilla y posibles forzantes. *Meteorologica*, 40, 17-42.

Schwerdtfeger, W., 1976. The atmospheric circulation over Central and South America. *Climates of Central and South America*. Vol. 12, W. Schwerdtfeger, Ed., World Survey of Climatology Series, Elsevier, 2–12.

Seluchi, M.E. y Garreaud, R.D., 2012. Campos médios e processos físicos associados ao ciclo de vida da Baixa do Chaco. *Rev. Bras. Meteorol.* [online], 27, 4, 447-462. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862012000400008>.

Seluchi, M.E., Saulo, C., Nicolini, M. and Satyamurty, P., 2003. The Northwestern Argentinean Low: A study of two typical events. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 2361-2378.

Seluchi, M.E. y Saulo, A.C., 2012a. Mecanismos físicos associados à formação da Baixa do Chaco. *Anales del XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Belén, Brasil (disco compacto).

Seluchi, M.E. y Saulo, A.C., 2012b. Baixa do Noroeste Argentino e Baixa do Chaco: características, diferenças e semelhanças. *Rev. Bras. Meteorol.* [online]. 2012, 27, 1, 49-60. ISSN 0102-7786. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862012000100006>.

Silva Dias, P.L., Schubert, W.H. y De Maria, M., 1983. Large-scale response of the tropical atmosphere to transient convection. *J. of the Atmos. Sci.*, 40, 11, 2689-2707.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M.M.B, Miller, H.L. and Chen, Z., 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Vol. 1, S. Solomon et al, Eds., Cambridge University Press, 235-336.

Trauth, M.H., Alonso, R.A., Haselton, K.R., Hermanns, R.L. y Strecker, M.R., 2000. Climate change and mass movements in the NW Argentine Andes. *Earth and Planetary Science Letters*, 179, 243-256.

Trenberth, K.E., 1997. The definition of El Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 2771–2777.

Trenberth, K.E. y Caron, J.M., 2000. *The Southern Oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures, and precipitation. J. Climate*, 13, 4358–4365.

Trenberth, K.E., Jones, P.D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J.A., Rusticucci, M., Soden, B. y Zhai, P., 2007. *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Vol. I, Cambridge University Press*, págs. 235–336.

Trenberth, K.E. y Stepaniak, D.P., 2001. *Indices of El Niño Evolution. J. Climate*, 14(8), 1697–701.

Troup, A.J., 1965. *The Southern Oscillation. Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 91, 490-506.

Tukey, J., 1949. *Comparing Individual Means in the Analysis of Variance. Biometrics*, 5, 99-114.

Vargas, W.M., Minetti, J. and Poblete, A., 1995. *Statistical study of climate Jump in the regional zonal circulation over South America. J. Met. Soc. Japan.* 73, 849-855.

Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Gochis, D., Gutzler, D., Lettenmaier, D., Marengo, J., Mechoso, C.R., Nogues-Paegle, J., Silva Dias, P.L., and Zhang, C.Ç., 2006. *Toward a Unified View of the American Monsoon Systems. J. Climate*, 19, 4977-5000.

Vuille, M., 1999. *Atmospheric circulation over the Bolivian Altiplano during dry and wet periods and extreme phases of the southern oscillation. Int. J. Climatol.*, 19, 1579-1600.

Vuille, M., Bradley, R.S. y Keimig, F.F., 2000. *Interannual climatic variability in the Central Andes and its relation to tropical Pacific and Atlantic forcing. J. Geophys. Res.*, 105, 12447-12460.

Wolter, K., y Timlin, M.S., 1998. *Measuring the strength of ENSO events - how does 1997/98 rank? Weather*, 53, 9, 315-324.

Wolter, K., y Timlin, M.S., 2011. *El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext)*. *Int. J. Climatol.*, 31, 14, 1074-1087.

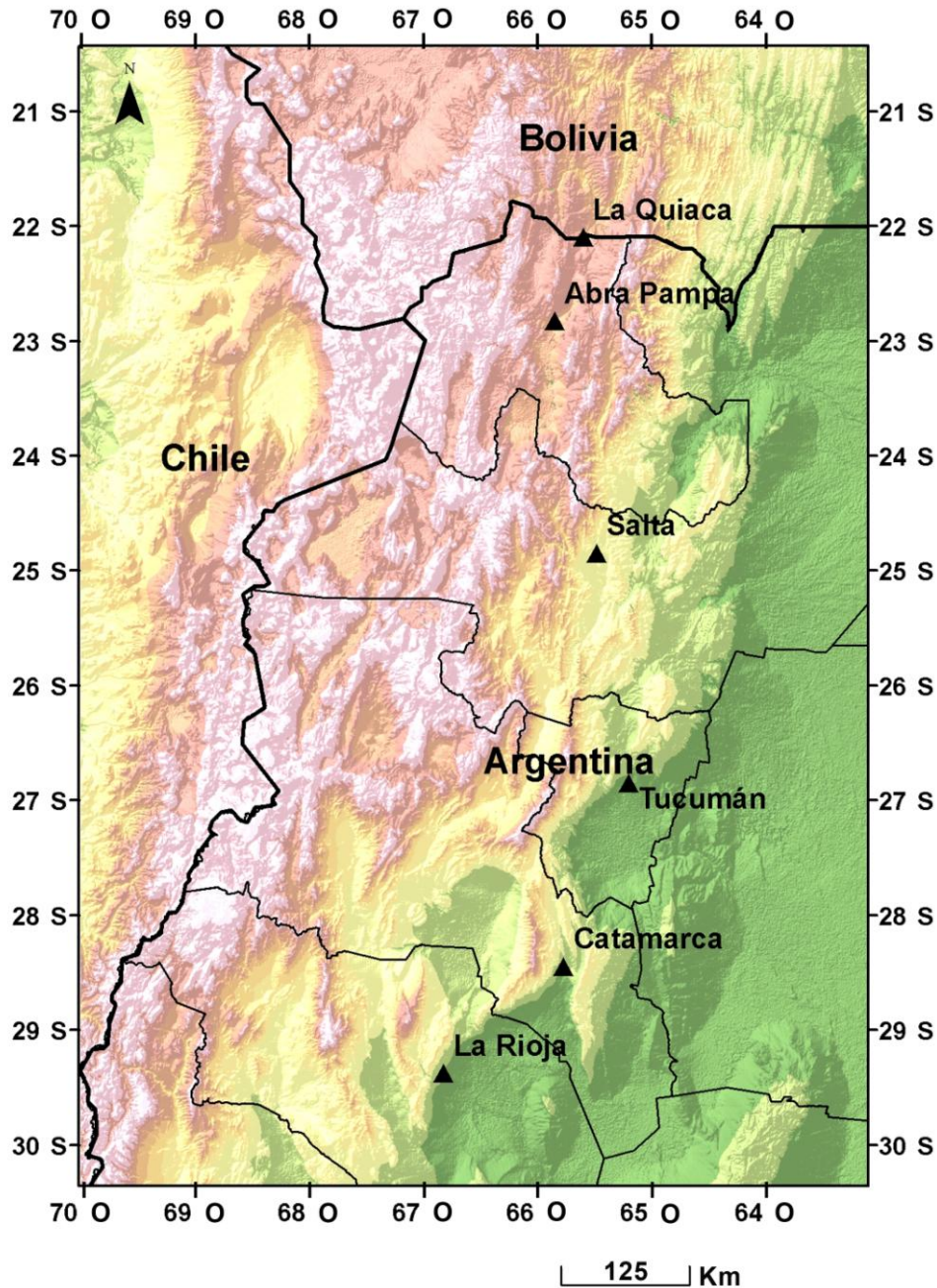
Yamamoto, R., Iwashima, T., Sanga, N.K. y Hoshiai, M., 1987. *Detection of the Climatic Jumps*. XIX IUGG. General Assembly. 1-9. Vancouver, Canadá.

Yuchechen, A.E., Bischoff, S. y Canziani, P., 2007. *Variabilidad de perturbaciones espaciales y temporales de 500 hPa para sistemas tropicales y extratropicales de Sudamérica*. *GEOACTA*, 32, 1-17.

Artículo en edición



Figura 1a. Región del Cono Sur de Sudamérica abarcando el centro y norte de Argentina. Límites provinciales en línea gruesa color gris. El área del recuadro está ampliada en la Figura 1b, e incluye la región de estudio con la ubicación de las seis estaciones meteorológicas seleccionadas.



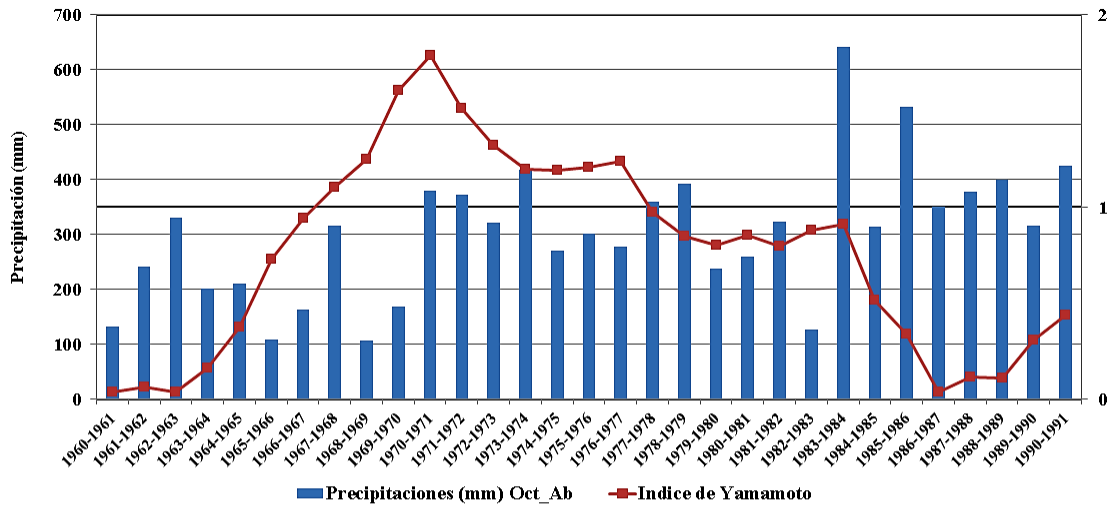
Referencias

▲ Estaciones Meteorológicas	COTAS	1 001 - 1 500	3 001 - 3 500
— Límites Provinciales	msnm	1 501 - 2 000	3 501 - 4 000
— Límites internacionales		2 001 - 2 500	4 001 - 5 000
		501 - 1 000	2 501 - 3 000
			> 5 000

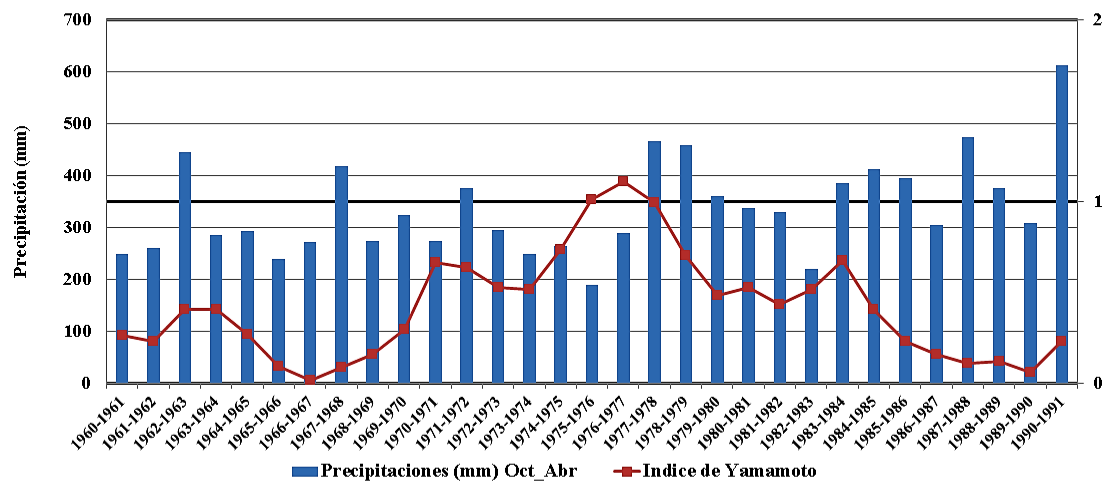
Figura 1b. Área de estudio, que incluye parte de la Región NOA y el sur del Altiplano Boliviano, con límites políticos. Se muestra el relieve elaborado con datos altimétricos provistos por la NASA, con intervalos de clase de altitud y la ubicación de las seis localidades estudiadas.

Artículo en edición

Indice de Yamamoto y precipitaciones en mm entre octubre y abril para Abra Pampa



Indice de Yamamoto y precipitaciones en mm entre octubre y abril para La Quiaca



Indice de Yamamoto y precipitaciones en mm entre octubre y abril para Catamarca

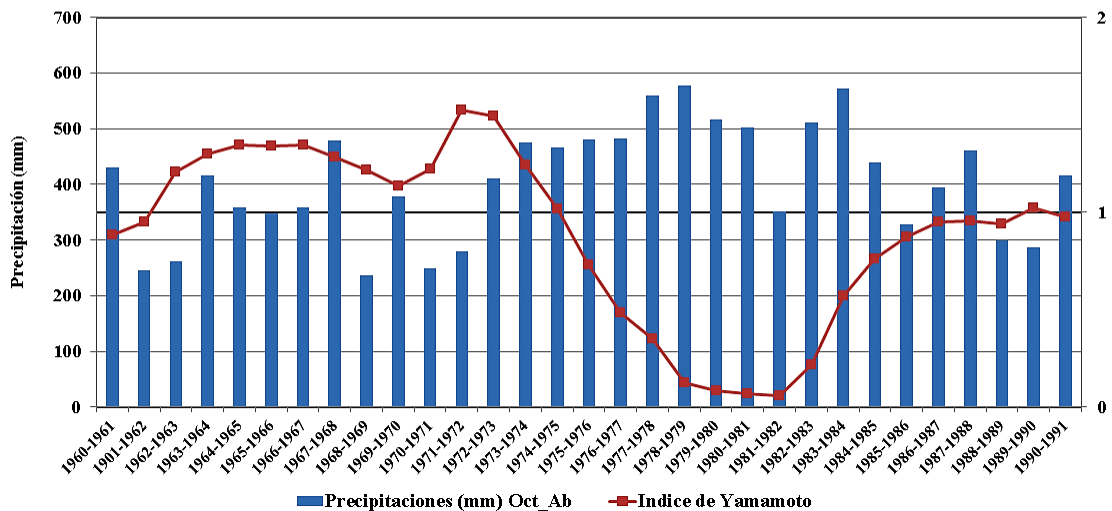
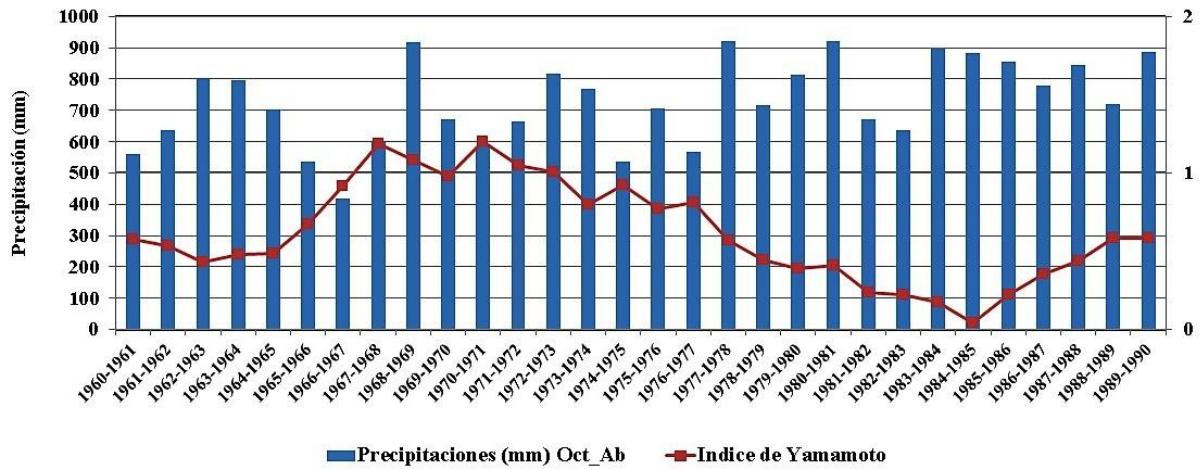


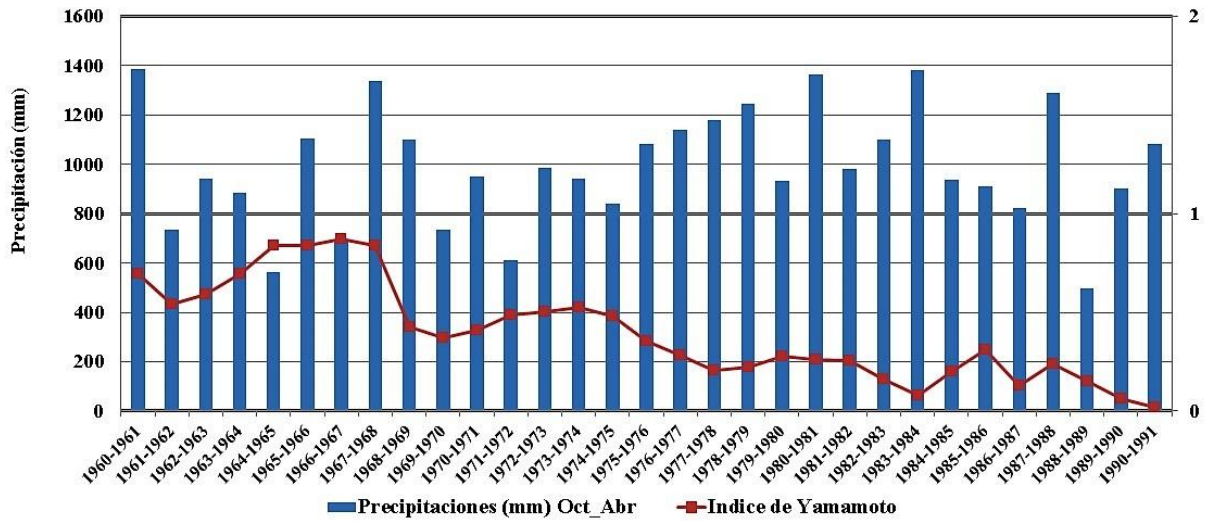
Figura 2a. Series de precipitación acumulada en el período O-A y marchas interanuales del índice de Yamamoto para las localidades Abra Pampa, La Quiaca y Catamarca.

Artículo en edición

Indice de Yamamoto y precipitaciones en mm entre octubre y abril para Salta



Indice de Yamamoto y precipitaciones en mm entre octubre y abril para Tucumán



Indice de Yamamoto y precipitaciones en mm entre octubre y abril para La Rioja

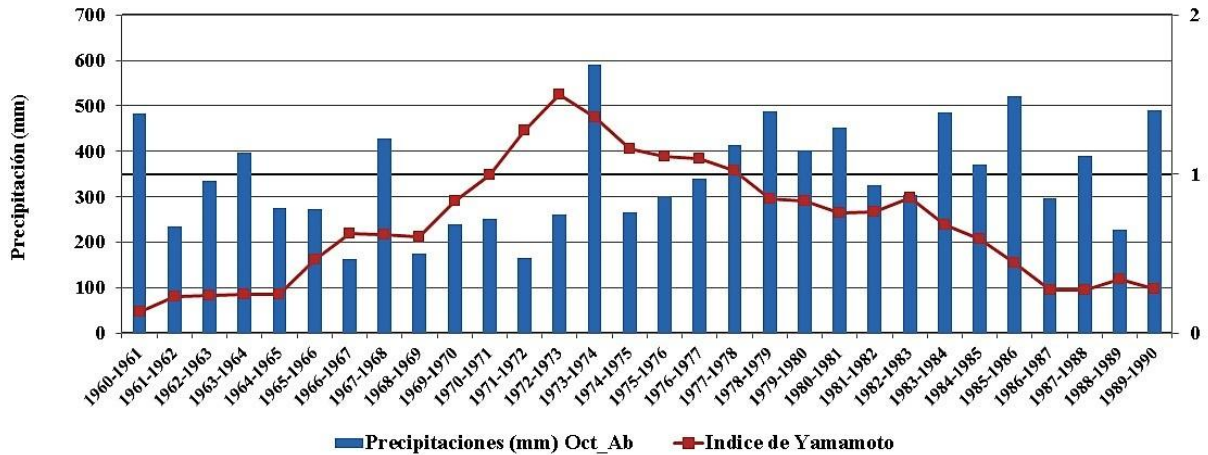


Figura 2b. Series de precipitación acumulada en el período O-A y marchas interanuales del índice de Yamamoto para las localidades Salta, Tucumán y La Rioja.

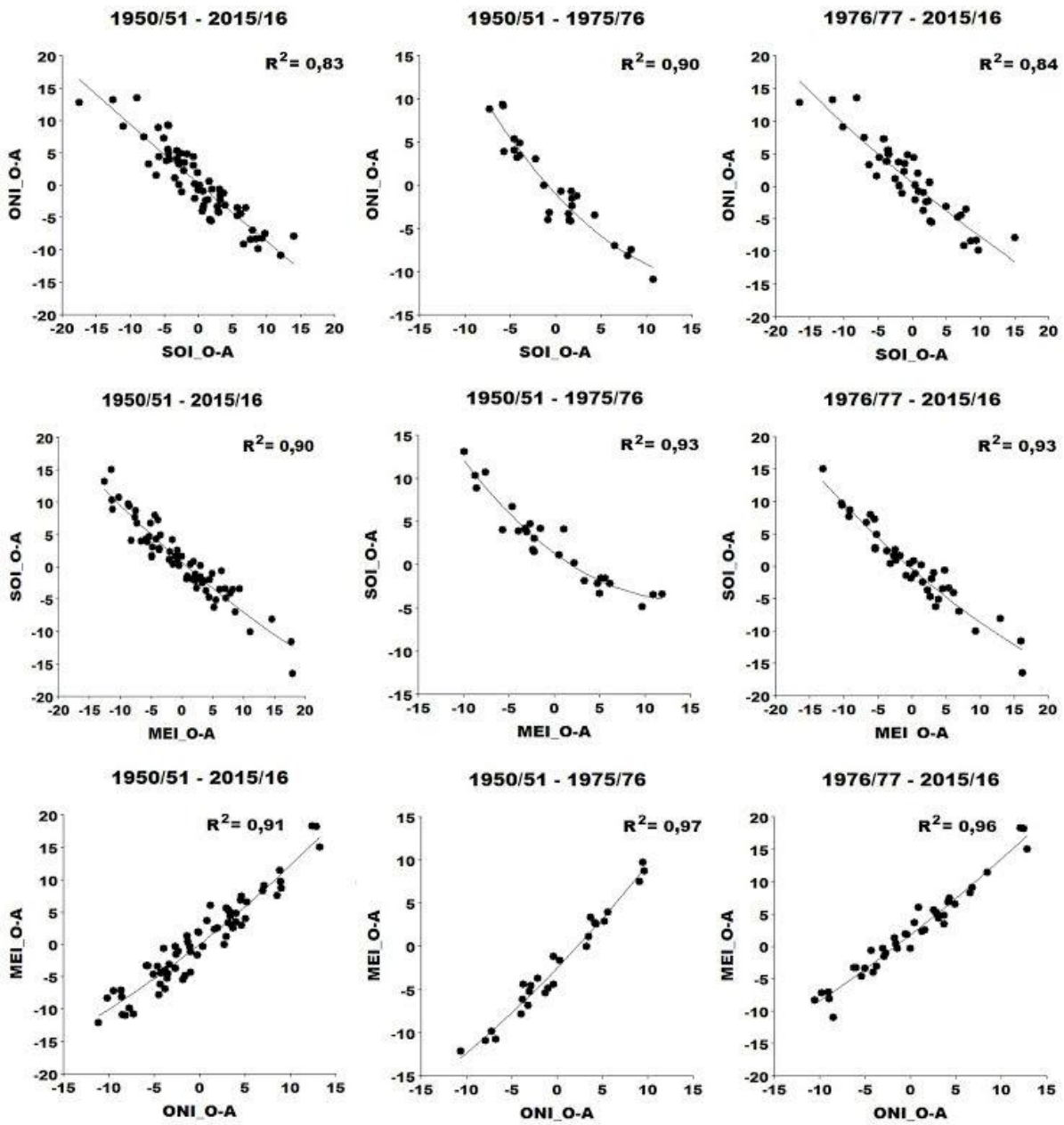


Figura 3. Diagramas de dispersión que relacionan de a pares los índices SOI_O-A, ONI_O-A y MEI_O-A. Regresiones polinómicas de orden 2 y sus coeficientes de determinación, para los períodos 1950/51 – 2015/16, 1950/51 – 1975/76 y 1976/77 – 2015/2016.

Artículo en edición

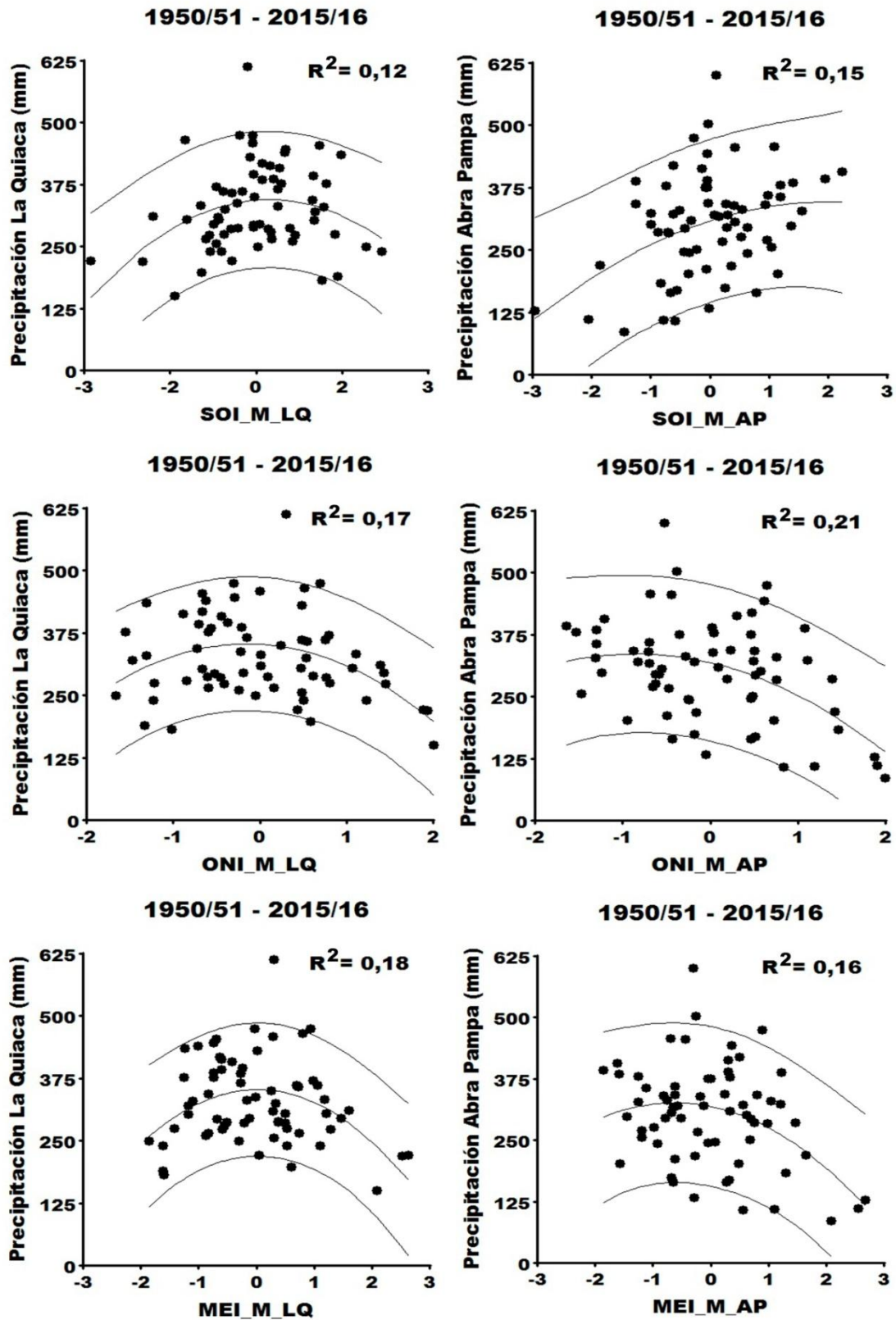
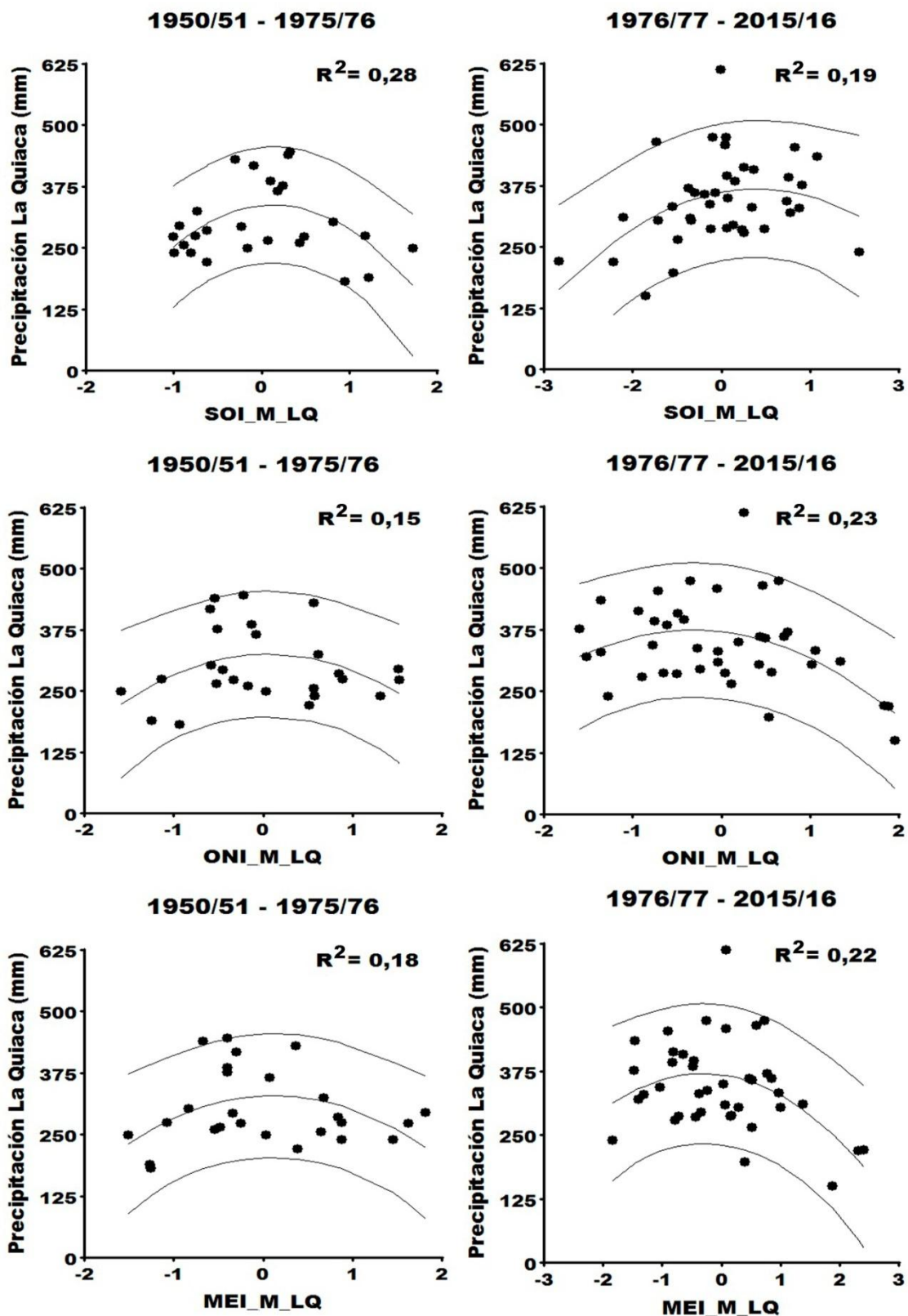


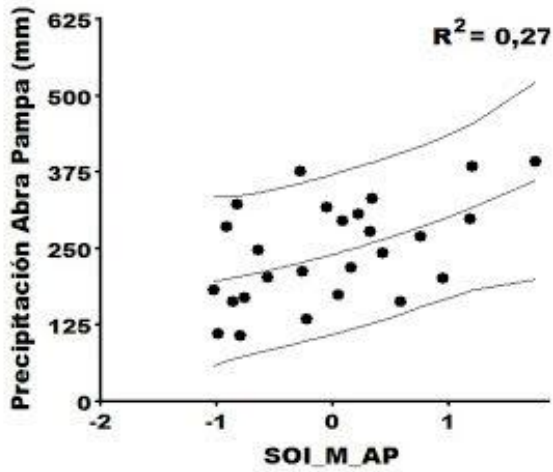
Figura 4. Precipitación acumulada O-A en La Quiaca y Abra Pampa, en función de los índices SOI_M, ONI_M y MEI_M obtenidos para cada localidad. Regresiones polinómicas de orden 2 y

Artículo en edición

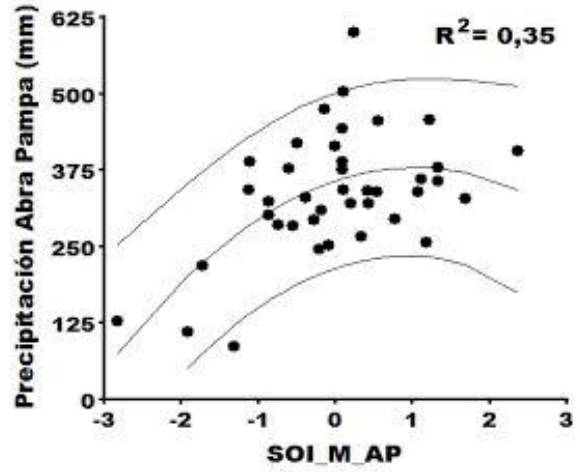
sus banda de predicción de 90% para el período 1950/51 – 2015/16. Se indica en cada caso el coeficiente de determinación.



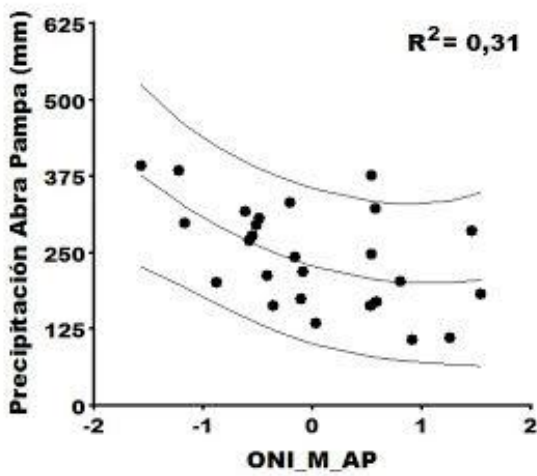
1950/51 - 1975/76



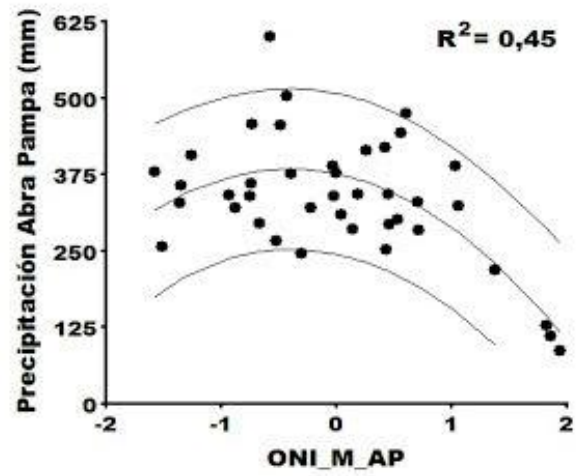
1976/77 - 2015/16



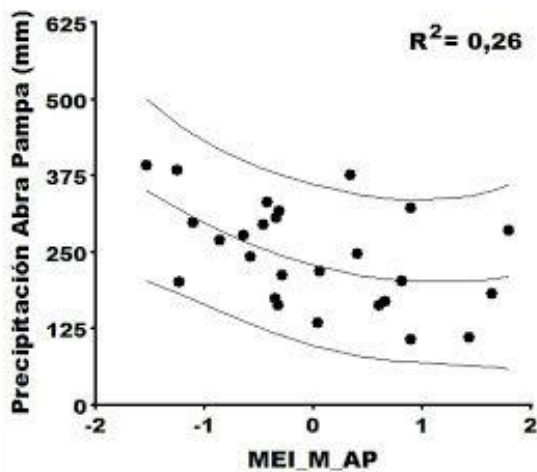
1950/51 - 1975/76



1976/77 - 2015/16



1950/51 - 1975/76



1976/77 - 2015/16

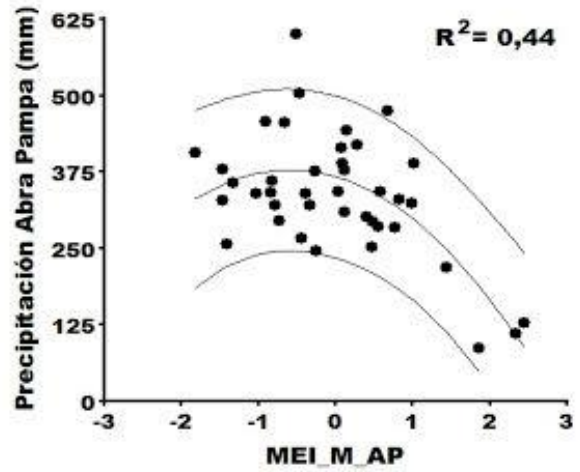


Figura 6. Precipitación acumulada O-A en Abra Pampa en función de los índices SOI_M_AP, ONI_M_AP y MEI_M_AP. Regresiones polinómicas de orden 2 y sus banda de predicción de 90% para los períodos 1950/51 – 1975/76 y 1976/77 - 2015/16. Se indica en cada caso el coeficiente de determinación.

Artículo en edición

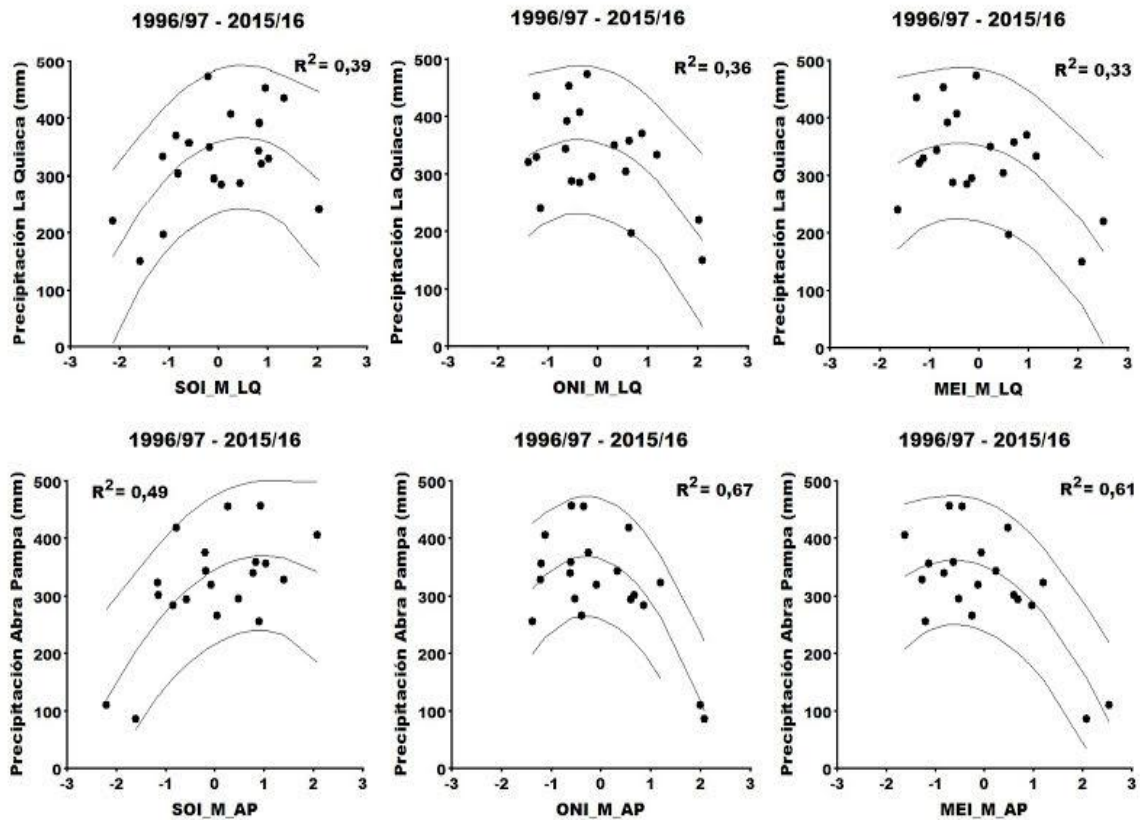


Figura 7. Precipitación acumulada O-A en La Quiaca y Abra Pampa en función de los índices SOI_M, ONI_M y MEI_M obtenidos para cada localidad. Regresiones polinómicas de orden 2 y sus banda de predicción de 90% para el período 1996/97 – 2015/16. Se indica en cada caso el coeficiente de determinación.

Localidad	Latitud Sur	Longitud Oeste	H SNM	Institución	Período
La Quiaca	22,1	65,6	3459	SMN	1935-2016
Abra Pampa	22,83	65,85	3484	INTA	1935-2016
Salta	24,85	65,48	1221	SMN	1935-2016
Tucumán	26,85	65,2	450	SMN	1935-2016
Catamarca	28,45	65,77	531	SMN	1935-2016
La Rioja	29,38	66,82	429	SMN	1935-2016

Tabla I. Lista de estaciones meteorológica en las localidades seleccionadas. Nombre, coordenadas geográficas, altura SNM, institución a la que pertenece y período de datos analizado.

La Quiaca	Bloque	Período	N	Media	CV	Mín.	Máx.	DF	B2/B1
	1	1908/09 1975/76	68	307	26	175	522	A	1,12
	2	1976/77 2015/16	40	344	26	149	612	B	
La Quiaca	Bloque	Período	N	Media	CV	Mín.	Máx.	DF	B2/B1
	1	1935/36 1975/76	41	308	27	182	522	A	1,12
	2	1976/77 2015/16	40	344	26	149	612	A	
Abra Pampa	Bloque	Período	N	Media	CV	Mín.	Máx.	DF	B2/B1
	1	1935/36 1969/70	35	234	39	107	433	A	1,43
	2	1970/71 2015/16	46	335	28	85	600	B	
Salta	Bloque	Período	N	Media	CV	Mín.	Máx.	DF	B2/B1
	1	1935/36 1969/70	35	644	19	386	918	A	1,14
	2	1970/71 2015/16	46	734	19	404	1013	B	
Catamarca	Bloque	Período	N	Media	CV	Mín.	Máx.	DF	B2/B1
	1	1935/36 1970/71	36	335	23	176	514	A	1,18
	2	1971/72 2015/16	45	395	30	215	633	B	
La Rioja	Bloque	Período	N	Media	CV	Mín.	Máx.	DF	B2/B1
	1	1935/36 1971/72	37	295	32	131	527	A	1,3
	2	1972/73 2015/16	44	382	34	137	618	B	

Tabla II. Descriptores estadísticos y Test de Tukey (con distribución *t* de Student al nivel $\alpha=0,05$) de la precipitación (mm) en el período O-A en las seis localidades estudiadas. Series divididas en Bloques 1-antes del salto climático correspondiente- y Bloque 2 –a partir de este-. A y B representan poblaciones estadísticas diferentes (diferencias significativas según el test de

Artículo en edición

Tukey). Se repite el análisis para La Quiaca sobre el período 1908/09 – 1975/76. La columna derecha muestra la razón entre las medias de los Bloques 2 y 1.

Artículo en edición

Denom.	Período	N	LQ	AP	CA	LR	SA	TU
P1	1935/36 1975/76	41	308	248	345	301	650	869
P2	1976/77 2015/16	40	344	336	391	385	738	996
P3	1976/77 1995/96	20	361	353	423	393	746	1018
P4	1996/97 2015/16	20	327	318	359	378	730	975
P21	Razón P2 / P1		1,12	1,36	1,13	1,28	1,14	1,15
P43	Razón P4 / P3		0,9	0,9	0,85	0,96	0,98	0,96
P41	Razón P4 / P1		1,06	1,28	1,04	1,26	1,12	1,12

Tabla III. Valores promedio de precipitación (mm) en el período octubre – abril (O-A) en La Quiaca (LQ), Abra Pampa (AP), Catamarca (CA), La Rioja (LR), Salta (SA) y Tucumán (TU) en los cuatro períodos denominados P1, P2 P3 y P4, y razones entre los montos de los períodos indicados. Los últimos 20 años (1996/97 – 2015/16) y los anteriores 20 años (1976/77 – 1995/96) pertenecen al período a partir de la TCP. Se indica en cada caso el tamaño de la muestra (N).

Indice	Media	Mediana	1ºcuartil	3ºcuartil	Mín.	Máy.
SOI_O-A	0,93	0,85	-2,43	4,18	-16,5	15
ONI_O-A	0,25	-0,35	-3,65	3,98	-10,9	13,5
MEI_O-A	0,36	-0,18	-4,51	4,68	-12,2	18,3

Tabla IV. Descriptores estadísticos de los índices SOI_O-A, ONI_O-A y MEI_O-A, para el período 1950/51 -2015/16.

Artículo en edición

Localidad	Peso 1	Peso 2	Peso 3	Peso 4	Peso 5	Peso 6	Peso 7
	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR
La Quiaca	0,045	0,088	0,218	0,271	0,207	0,147	0,024
Abra Pampa	0,017	0,062	0,198	0,285	0,264	0,149	0,025
Salta	0,035	0,089	0,192	0,266	0,219	0,154	0,045
Tucumán	0,069	0,109	0,174	0,226	0,183	0,167	0,072
Catamarca	0,064	0,119	0,165	0,227	0,212	0,149	0,064
La Rioja	0,056	0,100	0,169	0,226	0,206	0,180	0,063

Tabla V. Lista de coeficientes de ponderación (pesos) de la precipitación mensual en el período octubre – abril (O-A) para las localidades analizadas. Los pesos indican la contribución de la precipitación media de cada mes al total acumulado en el período O-A. Series de 1935/36 a 2015/16.

Artículo en edición

Localidad	Índice ENSO	1950/51 – 1975/76	1976/77 – 2015/16
		R^2	R^2
La Quiaca	ONI_M_LQ	0,15	0,23
La Quiaca	MEI-M_LQ	0,18	0,22
Abra Pampa	ONI_M_AP	0,31	0,45
Abra Pampa	MEI-M_AP	0,26	0,44
Salta	ONI_M_SA	0,04	0,1
Salta	MEI-M_SA	0,04	0,1
Tucumán	ONI_M_TU	0,15	0,01
Tucumán	MEI-M_TU	0,13	0,01
Catamarca	ONI_M_CA	0,01	0,02
Catamarca	MEI-M_CA	0,01	0,01
La Rioja	ONI_M_LR	0,04	0,04
La Rioja	MEI-M_LR	0,01	0,01

Tabla VI. Coeficientes de determinación (R^2) de las regresiones polinómicas de orden 2 entre la precipitación O-A y los respectivos índices ONI_M y MEI_M para las localidades analizadas, antes y a partir de la TCP. Se resaltan en negrita los casos de La Quiaca a partir de la TCP y los de Abra Pampa en ambos períodos, en los que se obtuvieron los valores más altos de R^2 .

LA QUIACA							
BLOQUE	FASE	N	Media	CV	Mín.	Máx.	B2/B1
1	Niña	7	293	35	182	439	1,2
1	Neutro	12	318	24	220	445	1,15
1	Niño	7	276	11	240	324	1,13
2	Niña	11	351	19	239	453	
2	Neutro	16	365	25	264	612	
2	Niño	13	312	31	150	474	
ABRA PAMPA							
BLOQUE	FASE	N	Media	CV	Mín.	Máx.	B2/B1
1	Niña	7	305	22	201	392	1,14
1	Neutro	12	238	32	133	375	1,56
1	Niño	7	196	42	107	321	1,44
2	Niña	11	349	15	256	456	
2	Neutro	16	370	25	245	600	
2	Niño	13	282	43	85	474	

Tabla VII. Descriptores estadísticos de la precipitación acumulada O-A (mm) en La Quiaca y Abra Pampa, agrupada por fases Niña, Neutra y Niño. Serie 1950/51 – 2015/16 dividida en Bloques 1 y 2: antes y a partir de la TCP. Se indican en negrita los grupos con solo 7 casos.

Período	Índice	Fase	AP	Período	Índice	Fase	AP
Oct-Abr	ONI_M_AP	ENSO	(mm)	Oct-Abr	ONI_M_AP	ENSO	(mm)
1973 / 74	-1,61	NA	392	1960 / 61	-0,01	NE	133
1988 / 89	-1,50	NA	379	1978 / 79	0,05	NE	388
1999 / 00	-1,44	NA	256	1981 / 82	0,06	NE	339
2007 / 08	-1,28	NA	328	1989 / 90	0,08	NE	377
1975 / 76	-1,27	NA	384	1993 / 94	0,12	NE	308
1998 / 99	-1,27	NA	357	1992 / 93	0,22	NE	285
1970 / 71	-1,21	NA	298	2003 / 04	0,27	NE	343
2010 / 11	-1,18	NA	406	1990 / 91	0,34	NE	413
1955 / 56	-0,92	NA	201	1951 / 52	0,50	NE	163
1984 / 85	-0,85	NA	341	1953 / 54	0,50	NE	375
1995 / 96	-0,80	NA	319	1952 / 53	0,50	NE	246
2011 / 12	-0,67	NA	339	2014 / 15	0,50	NE	418
2000 / 01	-0,66	NA	359	1979 / 80	0,52	NO	251
1967 / 68	-0,66	NA	316	1958 / 59	0,53	NO	321
2008 / 09	-0,65	NA	456	1977 / 78	0,53	NO	342
1950 / 51	-0,62	NA	269	2006 / 07	0,54	NE	293
1954 / 55	-0,59	NA	276	1969 / 70	0,55	NO	169
2005 / 06	-0,59	NA	295	2004 / 05	0,61	NO	300
1974 / 75	-0,55	NE	294	1976 / 77	0,64	NO	443
1971 / 72	-0,53	NE	305	1987 / 88	0,68	NO	474
1983 / 84	-0,49	NE	600	1963 / 64	0,76	NO	202
1964 / 65	-0,46	NE	211	1994 / 95	0,79	NO	329
2013 / 14	-0,44	NE	266	2002 / 03	0,79	NO	283
1996 / 97	-0,41	NE	455	1968 / 69	0,87	NO	107
1966 / 67	-0,40	NE	163	1986 / 87	1,11	NO	387
1985 / 86	-0,35	NE	502	2009 / 10	1,14	NO	322
2012 / 13	-0,32	NE	375	1965 / 66	1,22	NO	109
1962 / 63	-0,25	NE	331	1972 / 73	1,42	NO	285
1980 / 81	-0,22	NE	245	1991 / 92	1,46	NO	219
1961 / 62	-0,20	NE	242	1957 / 58	1,50	NO	182
2001 / 02	-0,14	NE	319	1982 / 83	1,91	NO	128
1956 / 57	-0,14	NE	173	1997 / 98	1,94	NO	110
1959 / 60	-0,12	NE	218	2015 / 16	2,02	NO	85

Tabla VIII. Abra Pampa. Discriminación por fases Neutra (NE), Niña (NA) y Niño (NO) para el período octubre-abril (O-A). Los casos se muestran en orden creciente del índice ONI_M_AP. Se muestra asimismo la precipitación O-A en Abra Pampa. La serie cubre el lapso 1950/51 a 2015/16. Los veranos a partir del salto climático están en negrita. Los 16

mínimos de precipitación están en color rojo oscuro, con los 9 menores en negrita. Los 16 máximos de precipitación están en color celeste, con los 9 mayores en negrita.

Período	Índice	Fase	LQ	Período	Índice	Fase	LQ
Oct-Abr	ONI_M_LQ	ENSO	(mm)	Oct-Abr	ONI_M_LQ	ENSO	(mm)
1973 / 74	-1,63	NA	249	1960 / 61	-0,01	NE	248
1988 / 89	-1,51	NA	376	1978 / 79	0,04	NE	458
1999 / 00	-1,43	NA	320	1981 / 82	0,05	NE	330
1975 / 76	-1,29	NA	189	1989 / 90	0,05	NE	308
1998 / 99	-1,27	NA	329	1993 / 94	0,12	NE	287
2007 / 08	-1,27	NA	435	1992 / 93	0,19	NE	264
2010 / 11	-1,19	NA	239	2003 / 04	0,8	NE	350
1970 / 71	-1,18	NA	274	1990 / 91	0,34	NE	612
1955 / 56	-0,98	NA	182	1952 / 53	0,47	NE	220
1984 / 85	-0,85	NA	412	2014 / 15	0,51	NE	303
1995 / 96	-0,81	NA	279	1951 / 52	0,52	NE	256
2011 / 12	-0,69	NA	343	1953 / 54	0,52	NE	431
2000 / 01	-0,67	NA	392	1979 / 80	0,52	NO	360
1950 / 51	-0,63	NA	303	1958 / 59	0,54	NO	240
1967 / 68	-0,63	NA	417	1977 / 78	0,55	NO	465
2008 / 09	-0,63	NA	453	1969 / 70	0,57	NO	324
1954 / 55	-0,59	NA	433	2006 / 07	0,58	NE	358
2005 / 06	-0,57	NA	287	2004 / 05	0,62	NO	197
1974 / 75	-0,56	NE	264	1976 / 77	0,66	NO	288
1971 / 72	-0,55	NE	376	1987 / 88	0,74	NO	474
1983 / 84	-0,52	NE	385	1994 / 95	0,79	NO	361
1964 / 65	-0,49	NE	293	1963 / 64	0,80	NO	285
2013 / 14	-0,42	NE	284	2002 / 03	0,83	NO	370
1996 / 97	-0,41	NE	407	1968 / 69	0,85	NO	274
1966 / 67	-0,38	NE	272	1986 / 87	1,10	NO	304
1985 / 86	-0,34	NE	394	2009 / 10	1,14	NO	332
2012 / 13	-0,27	NE	474	1965 / 66	1,27	NO	240
1962 / 63	-0,26	NE	445	1991 / 92	1,43	NO	310
1961 / 62	-0,21	NE	260	1972 / 73	1,47	NO	294
1980 / 81	-0,19	NE	337	1957 / 58	1,48	NO	272
1956 / 57	-0,17	NE	385	1982 / 83	1,92	NO	220
2001 / 02	-0,16	NE	295	1997 / 98	1,97	NO	219
1959 / 60	-0,12	NE	365	2015 / 16	2,04	NO	150

Tabla IX. La Quiaca. Discriminación por fases Neutra (NE), Niña (NA) y Niño (NO) para el período octubre-abril (O-A). Los casos se muestran en orden creciente del índice ONI_M_AP.

Artículo en edición

Se muestra asimismo la precipitación O-A en La Quiaca. La serie cubre el lapso 1950/51 a 2015/16. Los veranos a partir del salto climático están en negrita. Los 16 mínimos de precipitación están en color rojo oscuro, con los 7 menores en negrita. Los 15 máximos de precipitación están en color celeste, con los 6 mayores en negrita.

Artículo en edición

LQ	5 m	10 m	20 m		5 M	10 M	20 M
NO	3	6	8		2	2	3
NE	0	1	7		3	5	10
NA	2	3	5		0	3	7
AP	5 m	10 m	20 m		5 M	10 M	20 M
NO	5	6	10		1	2	3
NE	0	4	9		3	5	10
NA	0	0	1		1	3	7

Tabla X. Cantidad de valores extremos de precipitación O-A del período 1950/51 – 2015/16 en La Quiaca y Abra Pampa discriminados por fases Neutra (NE), Niña (NA) y Niño (NO). Se muestran las frecuencias de los 5, 10 y 20 valores mínimos (m) y máximos (M).