

Influencia de ENOS en el régimen de precipitaciones en el Cono Sur de América

Hugo W. Fernández

Universidad Nacional de San Juan, Argentina

Bonifacio Fernández L.

Pontificia Universidad Católica de Chile

El fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) se ha relacionado con variaciones hidroclimáticas alrededor del mundo y se han determinado teleconexiones estadísticamente significativas. En este trabajo se identifican regiones de escala continental en los territorios al sur del Trópico de Capricornio en América del Sur, que presenten teleconexiones entre las fases extremas de ENOS y el fenómeno de las precipitaciones caracterizadas por medio del índice de precipitación estandarizada. La metodología utilizada se basa en la determinación de la primer armónica para el análisis compuesto agregado de los eventos El Niño y La Niña, y análisis de coherencia vectorial entre las estaciones hidrometeorológicas involucradas. Con el fin de determinar probabilidades y verificar los niveles de significancia de las relaciones encontradas se utiliza un modelo hipergeométrico. Por último, se detectan regiones del océano Pacífico que presentan las mayores correlaciones entre la temperatura superficial del mar y las cronologías correspondientes al índice cálido y al índice frío, que representan el comportamiento de las precipitaciones para cada región detectada.

Palabras clave: El Niño, La Niña, precipitaciones, teleconexiones, extremos meteorológicos, América del Sur, anomalías de temperatura superficial del mar.

Introducción

Durante los últimos años ha habido un marcado interés entre la comunidad científica internacional en el estudio, análisis y caracterización de variables hidroclimáticas, esto con el fin de comprender y explicar la influencia de los fenómenos atmosféricos-oceánicos globales sobre los patrones climáticos de la Tierra. Entre ellos, el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS) ha recibido especial atención, debido a que existe fuerte evidencia de la existencia de teleconexiones entre el comportamiento de las mismas en distintas partes del mundo y la ocurrencia de dicho evento. Tanto El Niño (EN) como La Niña (LN) constituyen fases complementarias y extremas de un mismo evento de escala global, cuyos efectos se hacen sentir en la agricultura, ganadería, pesca, etcétera, con graves

e importantes consecuencias de orden económico, social y del medio ambiente. ENOS ha sido relacionado con variaciones hidroclimáticas alrededor del orbe y se han determinado relaciones estadísticamente significativas con anomalías en el régimen de precipitaciones, caudales, temperaturas, etcétera (Montecinos *et al.*, 2000; Grimm *et al.*, 2000; Mosley, 2000; Nigam *et al.*, 1999; Chiew *et al.*, 1998; Piechota y Dracup, 1996; Dracup y Kahya, 1994; Kahya y Dracup, 1993a). Las sequías, consideradas como el extremo inferior de la estadística hidroclimática, no son ajenas a dichas influencias. Piechota y Dracup (1996) examinan las relaciones existentes entre las sequías hidrológicas y el fenómeno El Niño en Estados Unidos de América; para ello utilizan el índice de Palmer como indicador de una condición de sequía y logran identificar regiones de respuesta homo-

génea a las fases extremas de ENOS. Sun y Furbish (1997), por medio del análisis estadístico, demuestran que El Niño y La Niña son responsables de hasta 40% de la variabilidad interanual de las precipitaciones y hasta del 30% en las descargas del estado de La Florida. Chiew *et al.* (1998) hacen lo propio, pero aplicándolo al régimen de precipitaciones, caudales y sequías hidrológicas de Australia. Muestran que condiciones secas en dicho país tienden a estar asociadas con El Niño, con enlaces estadísticamente significativos. Los eventos La Niña también han sido asociados con condiciones de sequía en el estado de Texas, Estados Unidos de América, durante los meses correspondientes a la estación fría, con precipitaciones por debajo del promedio de septiembre a mayo (NOAA-CIRES 1999). Aplicando la metodología de análisis de componentes principales, Nigam *et al.* (1999) analizan las relaciones existentes entre las sequías hidrológicas en Estados Unidos de América, representadas por el índice de severidad de sequías de Palmer, y el campo de temperatura superficial del mar (TSM) entre los 20° sur y 60° norte de latitud, para el periodo de 1945 a 1993.

Al sur del Trópico de Capricornio y hasta el Cabo de Hornos en el continente americano, los territorios de Uruguay y parte de Argentina, Chile, Brasil y Paraguay pueden considerarse como la región no tropical de América del Sur, con climas diversos que van desde la aridez del desierto de Atacama y las zonas húmedas del Chaco, hasta la Patagonia fría al sur. Toda esta región frecuentemente se ve sometida a extremos climáticos, como inundaciones y sequías, provocadas por el exceso o la escasez de precipitaciones que afectan diferentes sitios con extensiones variables (Fernández y Fernández, 2000).

Este estudio tiene por objeto poner en evidencia la existencia de las relaciones entre los eventos El Niño y La Niña con el comportamiento de las precipitaciones en el ámbito geográfico de los territorios continentales al sur del Trópico de Capricornio. Para ello, el comportamiento cuantitativo de las precipitaciones es caracterizado por medio de series cronológicas mensuales de percentiles del Índice de Precipitación Estandarizada (IPE) (McKee *et al.*, 1993), con un paso de tiempo mensual y trimestral. Utilizando la metodología propuesta por Ropelewski y Halpert (1986), se identifican regiones de respuesta homogénea que presentan relaciones estadísticamente significativas con las fases extremas de ENOS, para el periodo de 1950 a 1988, y se pone en evidencia la significación estadística de tales relaciones. Para evaluar la importancia de estas posibles conexiones se presentan además mapas correspondientes a los campos de correlación simultánea entre la TSM y las series cronológicas correspondientes a indicadores de precipitaciones de-

terminadas para las regiones detectadas con señales estacionales de ENOS significativas y homogéneas.

Antecedentes

Para caracterizar el comportamiento meteorológico en la zona se utilizaron series cronológicas de precipitaciones mensuales de 503 estaciones distribuidas en toda el área de estudio, con longitudes de registro variables entre los años 1851 y 1998. Los registros no se sometieron a ningún tipo de relleno y solamente se efectuó un análisis de consistencia de la información, eliminándose aquella de calidad dudosa. Las nuevas series obtenidas así permitieron determinar las correspondientes series cronológicas mensuales del IPE para cada estación (McKee *et al.*, 1993). El periodo de análisis considerado corresponde al comprendido entre los años 1950 y 1988. La determinación de los años de El Niño y La Niña se basa en las definiciones presentadas por Rasmusson y Carpenter (1983) y Ropelewski y Jones (1987). Aquellos eventos cuyas condiciones persisten por varios años consecutivos se identifican por el primer año de un episodio individual. Por ello, dentro del intervalo de estudio tiene la ocurrencia de nueve eventos El Niño (1951, 1953, 1957, 1965, 1969, 1972, 1976, 1982 y 1986) y siete eventos La Niña (1950, 1955, 1964, 1970, 1973, 1975 y 1988).

Identificación de regiones homogéneas asociadas con ENOS

Debido a lo extensa de la región considerada, casi cinco millones de kilómetros cuadrados, es posible que no todas las zonas en su interior respondan de igual manera al fenómeno ENOS, incluso pueden existir regiones sin influencia apreciable. Como primera etapa, se trata de identificar regiones formadas por una cantidad razonable de estaciones cercanas, cuya respuesta tenga consecuencias apreciables y homogéneas atribuibles a ENOS. La metodología propuesta por Ropelewski y Halpert (1986, 1987) permite individualizar regiones potencialmente asociadas con el fenómeno ENOS, a partir de un análisis de la primer armónica y coherencia vectorial. Se fundamenta en el hecho de que, en general, variaciones de baja frecuencia en series cronológicas de variables climatológicas (armónicas con periodo largo) representan aspectos de la circulación atmosférica de gran escala, mientras que variaciones de alta frecuencia (armónicas con periodo corto) están asociadas con fenómenos locales (Kirkyla y Hameed, 1989). Sobre esta base, Ropelewski y Halpert (1986) asumen que la primera armónica ajustada para el análisis compuesto revela la

magnitud y fase de la señal relacionada con El Niño Oscilación del Sur.

El análisis compuesto de ENOS se utiliza para determinar características comunes a un número de casos individuales (Rasmusson y Carpenter, 1982). En una primera aproximación se considera que el periodo de vida del fenómeno El Niño varía de 18 a 28 meses (Philander, 1990; Rasmusson y Carpenter, 1983), de manera que se puede adoptar un periodo base de dos años para el análisis compuesto de eventos El Niño, comenzando en el mes de julio precedente al año del fenómeno (*julio-*) hasta el mes de junio siguiente al año del episodio (*junio+*). Con similares argumentos para los eventos fríos o La Niña, la base de tiempo considerada es de 36 meses (Kahya y Dracup, 1993b; Dracup y Kahya, 1994) desde el mes de enero precedente al año del fenómeno (*enero-*) hasta el mes de diciembre siguiente al año del episodio (*diciembre+*). Los meses en el año (0) (ilustración 1) indican aquellos en donde se presentan las máximas relaciones entre ENOS y anomalías en el océano Pacífico.

Definidos los periodos de interés para El Niño y La Niña, para cada estación se expresan las series de tiempo de IPE en categorías de percentiles de frecuencia relativa acumulada (PFA), limitando la información transformada en el rango de 0 a 1, reduciendo así la asimetría (Kahya y Dracup, 1993a). Estas series de PFA pueden determinarse directamente de los datos de cada estación como probabilidades empíricas o calcularse para las series de IPE, suponiendo una distribución normal estándar.

El análisis compuesto involucra en cada estación el promedio de los percentiles de IPE para cada uno de los 24 (36) meses de los nueve (siete) eventos El Niño (La Niña) considerados. Esto significa que las fluctuaciones resultantes de factores climatológicos sobre el periodo de 24 (36) meses pueden ser aproximadas con una curva con un máximo y mínimo, correspondiente a la primer armónica, como se muestra en la ilustración 1, para el caso de El Niño, con series de IPE de duración mensual.

El resultado obtenido para cada una de las estaciones es extractado en un vector, cuya longitud y dirección se corresponden a la amplitud y ángulo de fase de la primer armónica ajustada, lo que supone que la serie puede representarse por una serie de Fourier de una sola armónica:

$$f(t) = \overline{PFA} + C \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi t}{L} + \theta\right) \quad (1)$$

donde \overline{PFA} es el promedio del valor de los percentiles en el periodo L considerado (24 o 36 meses según se trate de El Niño o La Niña), C es la longitud del vector ajustado y θ es el desfase, cuyos valores se estiman a partir de la serie como:

$$C = (A^2 + B^2)^{0.5} \quad (2)$$

$$\theta = \text{Arc sen}\left(\frac{B}{A}\right) \quad (3)$$

donde A y B son los coeficientes de Fourier de la primera armónica:

$$A = \frac{1}{L} \sum_{t=1}^L PFA_t \cos \frac{\pi t}{L} \quad (4)$$

$$B = \frac{1}{L} \sum_{t=1}^L PFA_t \text{sen} \frac{\pi t}{L} \quad (5)$$

Graficar la primer armónica de cada estación como un vector de tamaño C y desfase θ sobre un mapa permite efectuar una primera aproximación subjetiva de regiones geográficas, denominadas regiones candidatas, que presenten un grado de asociación homogéneo con el fenómeno ENOS. A fin de disminuir la subjetividad en la identificación de regiones, es necesario individualizar zonas con grupos de vectores que presenten similitud en cuanto a dirección y amplitud, utilizando como herramienta cuantitativa para ello el grado de coherencia, el cual es definido por Kahya y Dracup (1993) como:

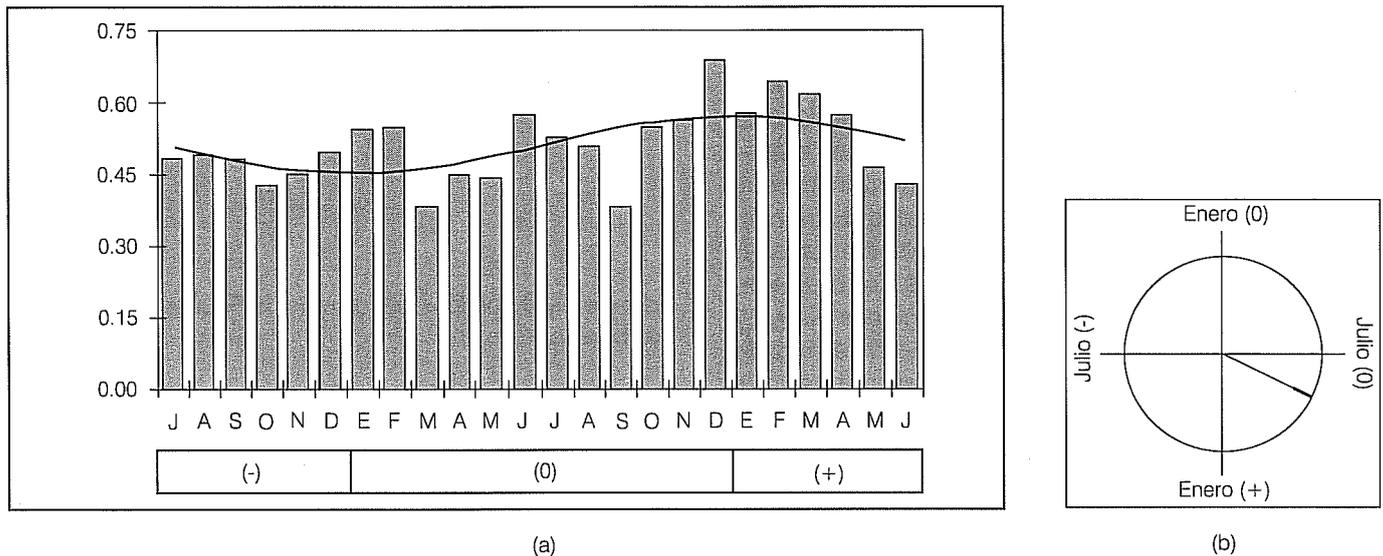
$$\text{Coherencia} = \frac{[V]}{S} \quad (6)$$

donde $[V]$ es el vector medio de la zona, considerando todas las estaciones que la forman, y S es el escalar medio, calculados como:

$$[V] = \frac{1}{n} \left[\left(\sum_{j=1}^n C_j \cos \theta_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^n C_j \text{sen} \theta_j \right)^2 \right]^{0.5} \quad (7)$$

$$S = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n C_j \quad (8)$$

Ilustración 1. a) Primer armónica ajustada para percentiles de IPE en un total de nueve eventos El Niño sobre un periodo base de 24 meses en una estación típica. b) Representación vectorial. La longitud y dirección respecto al oeste corresponden a la amplitud y ángulo de fase de la primer armónica ajustada.



siendo n el número de estaciones comprendidas en la zona considerada. Ropelewski y Halpert (1986) sugieren que un valor de coherencia igual o superior a 0.8 elimina las inconsistencias entre amplitudes y fases en el análisis de las regiones. En el presente estudio se considera un factor de coherencia mínimo de 0.9 para delimitar las regiones candidatas.

La metodología descrita permite identificar cuatro zonas en el Cono Sur de América: dos relacionadas con eventos El Niño, denominadas zona occidental-El Niño (ZOC-EN) y zona oriental-El Niño (ZOR-EN), y dos ligadas con el fenómeno La Niña, señaladas como zona occidental-La Niña (ZOC-LN) y zona oriental-La Niña (ZOR-LN), para cada una de las series originadas por los percentiles de IPE de uno y tres meses. Las ilustraciones 2 y 3 muestran las regiones mencionadas identificadas para las series de IPE de uno y tres meses, respectivamente, mientras que en el cuadro 1 se presentan valores de algunas de sus características, tales como número de estaciones comprendidas en cada zona, factor de coherencia alcanzado, superficie de cada una expresada en kilómetro cuadrado, así como también sus límites extremos como valores de latitud y longitud.

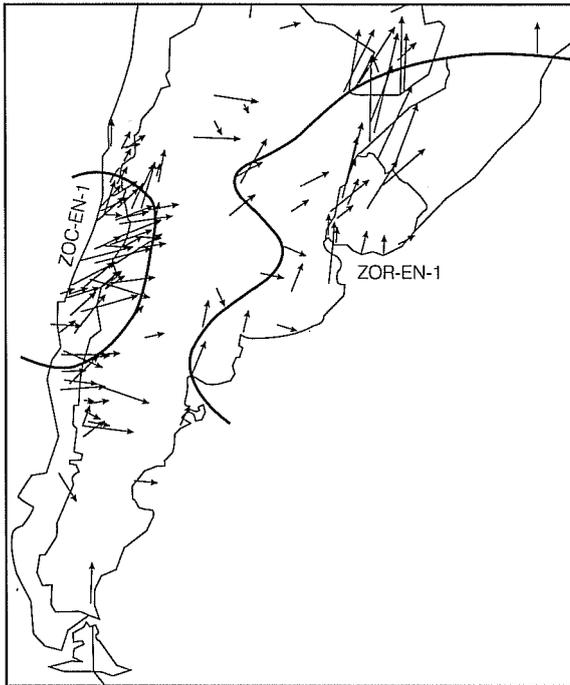
Tal como se aprecia en las ilustraciones 2 y 3, y en el cuadro 1, las zonas de influencia de El Niño y La Niña son muy similares, ya sea que se consideren uno o tres meses de precipitaciones para la estimación del IPE, y notoriamente, son prácticamente idénticas para las zonas con influencia homogénea de La Niña. La región ZOC-

LN incluye la zona central de Chile y su correspondiente parte andina en Argentina, mientras que ZOR-LN abarca la pampa húmeda alrededor del río de La Plata, Uruguay y una pequeña parte del sur brasileño. Las zonas de influencia de El Niño se desarrollan en los mismo sectores con algo más de amplitud hacia el sur en el caso de la zona occidental y hacia el norte en la oriental. Entre ambas zonas aparece la región intermedia de Argentina, en la cual no se detecta una influencia marcada de ninguna de las fases extremas del ENOS. Lo mismo ocurre con la zona sur de la Patagonia, quedando los 40° de latitud sur como el extremo de la influencia del fenómeno sobre las precipitaciones. Por otra parte, al norte del paralelo 29° sur no habría regiones con influencia homogénea notoria de La Niña y lo mismo ocurriría para la influencia de El Niño fuera de la vertiente atlántica en el sur de Brasil y norte de Argentina.

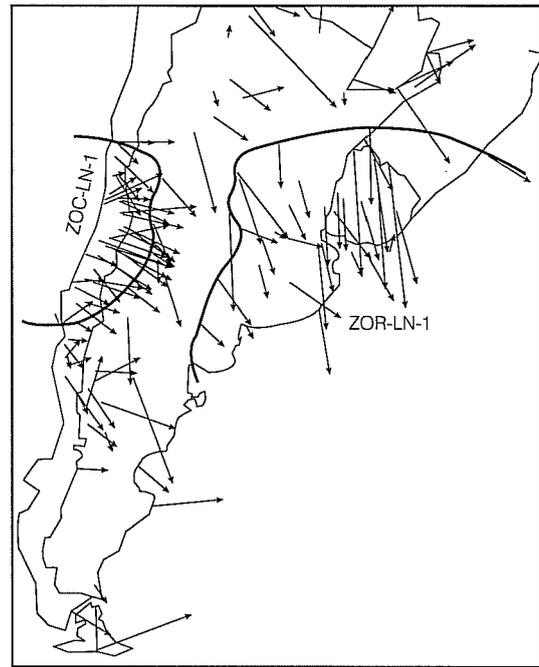
Verificación de conexiones para eventos El Niño y La Niña

Si bien el análisis de armónicas es reconocido como una buena técnica para analizar la variación espacial de parámetros climatológicos (Kirkyla y Hameed, 1989), para evaluar la consistencia temporal dentro de las regiones candidatas es necesario efectuar estudios más detallados. En cada una de las regiones candidatas identificadas y para el conjunto de estaciones climatológicas comprendidas en el ámbito geográfico de las mismas, los

Ilustración 2. Zonas detectadas en el análisis compuesto agregado para las series originadas por IPE de un mes. a) El Niño, b) La Niña.

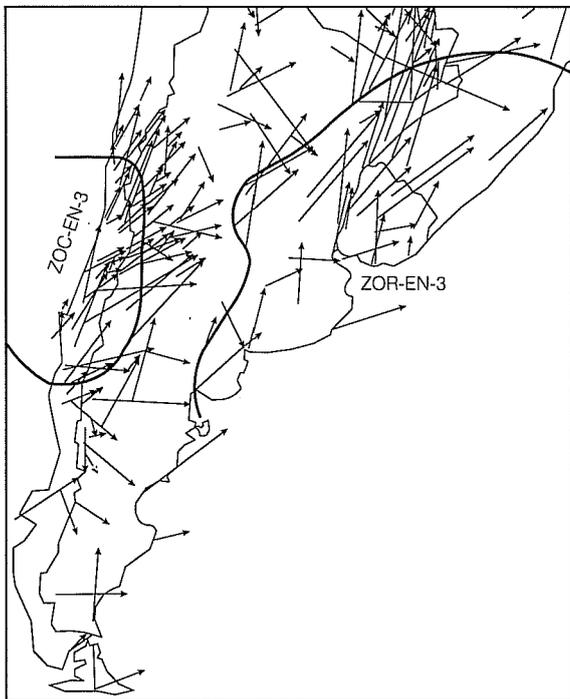


(a)

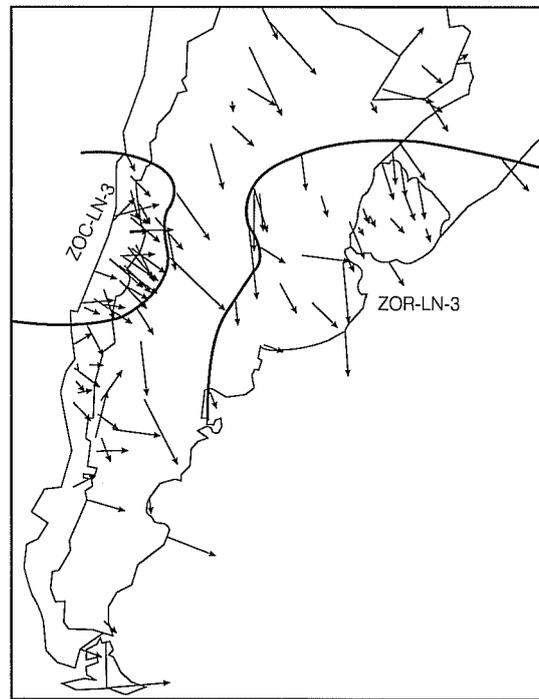


(b)

Ilustración 3. Zonas detectadas en el análisis compuesto agregado para las series originadas por IPE de tres meses. a) El Niño, b) La Niña.



(a)



(b)

Cuadro 1. Detalles de algunas características de las zonas identificadas para series de un mes.

Región	ZOC-EN-1	ZOR-EN-1	ZOC-LN-1	ZOR-LN-1	ZOC-EN-3	ZOR-EN-3	ZOC-LN-3	ZOR-LN-3
Núm. de estaciones	49	39	45	31	51	41	42	30
Coherencia	0.92	0.93	0.91	0.95	0.93	0.93	0.90	0.95
Superficie (km ²)	321,000	130,000	280,000	975,000	318,000	1,410,000	260,000	990,000
Límite N	29° 54'	23° 30'	29° 54'	29° 10'	29° 54'	23° 30'	29° 54'	29° 10'
Límite S	41° 25'	40° 43'	38° 46'	40° 43'	40° 34'	40° 43'	37° 48'	40° 43'
Límite E	68° 24'	46° 37'	68° 24'	51° 13'	69° 16'	46° 37'	68° 24'	51° 13'
Límite W	73° 58'	64° 57'	73° 58'	64° 57'	73° 58'	64° 57'	73° 3'	64° 57'

valores de percentiles de IPE de todos los eventos compuestos fueron promediados mes a mes (durante 24 meses para El Niño y 36 para La Niña) a fin de efectuar un análisis compuesto agregado, que permita identificar un *periodo estacional* que presente la mayor respuesta aparente al fenómeno en análisis. Es decir, durante los 24 meses considerados para los eventos El Niño se promediaron los valores mensuales de percentiles de IPE de cada mes de todas las estaciones de cada zona en los años asociados con los nueve eventos El Niño del periodo 1950-1988. Similarmente, es posible obtener valores de respuesta promedio para La Niña, pero empleando, en este caso, 36 meses para los siete eventos. Como criterio para seleccionar el periodo estacional, se pueden considerar al menos cinco meses consecutivos en que se mantenga la misma señal de anomalía (Kahya y Dracup 1993a). También es posible tomar en cuenta más meses consecutivos, aunque se interrumpan por anomalías de signo contrario, siempre que sean poco significativas, por ejemplo, menores de 0.10 (Mosley, 2000). Los meses considerados como periodo estacional para cada una de las zonas identificadas con influencias significativas se destacan más oscuros en los gráficos de las ilustraciones 4 y 5, y se detallan en el cuadro 2.

Para examinar la fiabilidad de las teleconexiones detectadas entre los eventos cálidos y fríos con el comportamiento de las precipitaciones en las zonas previamente identificadas, para cada zona se construye una serie cronológica para el periodo 1950-1988 de un índice cálido (IEN) y de uno frío (ILN), según corresponda, considerando en cada año el promedio de todas las estaciones de la zona, pero incluyendo sólo los valores de los meses detectados en el análisis compuesto agregado. Así, por ejemplo, para la zona ZOC-EN-1 se considera para cada año el promedio de las 49 estaciones de la zona, con los valores de los ocho meses de mayo a diciembre, con lo cual se construye el índice IEN de esa zona, cuya serie cronológica aparece en la ilustración 6a.

A fin de determinar los límites superior e inferior de los valores de IEN e ILN, se clasificaron todos los valores anuales en orden decreciente, obteniéndose la probabilidad empírica de un evento por medio de la fórmula de Weibull. Los valores correspondientes a las condiciones más secas y húmedas con probabilidades del 10 y 90%, respectivamente, se indican en las ilustraciones 6 y 7 como líneas horizontales llenas, donde, además, las barras sombreadas muestran los años correspondientes a un evento El Niño o La Niña.

Ropelewski y Halpert (1986) proponen utilizar la distribución hipergeométrica para asignar niveles de significancia a las relaciones existentes entre las fases extremas de ENOS y una condición de sequía o no sequía. La distribución hipergeométrica permite establecer la probabilidad (P) de que m sucesos se obtengan en n ensayos desde una población de tamaño N que contiene k de dichos eventos (Yevjevich, 1972). De acuerdo con esto, un suceso queda definido como la ocurrencia de una señal de condición de sequía (no sequía) para cualquier año, cuando la desviación respecto a la media del ILN (IEN) es negativa (positiva), estando asociada con un evento LN (EN). Por lo tanto, los parámetros del modelo para el caso de eventos LN (EN) son: k = número de años en que el ILN (IEN) está asociado con un evento LN (EN), n = número de años en que el ILN (IEN) es inferior (superior) a la media, m = número de años en que el ILN (IEN) siendo menor (mayor) que la media está asociado con un evento LN (EN). El cuadro 3 resume los resultados del modelo planteado para todas las regiones detectadas.

Se puede apreciar que las probabilidades de que ocurra por azar que en los años de eventos LN (EN) se produzcan anomalías negativas (positivas) son muy bajas, de manera que ello no puede deberse sino a una teleconexión efectiva entre el fenómeno ENOS y las condiciones de sequía (no sequía) en las regiones identificadas con influencia. En ambas zonas, la ocurrencia de El

Ilustración 4. Periodos estacionales considerados para las zonas: a) ZOC-EN-1, b) ZOR-EN-1, c) ZOC-LN-1, d) ZOR-LN-1.

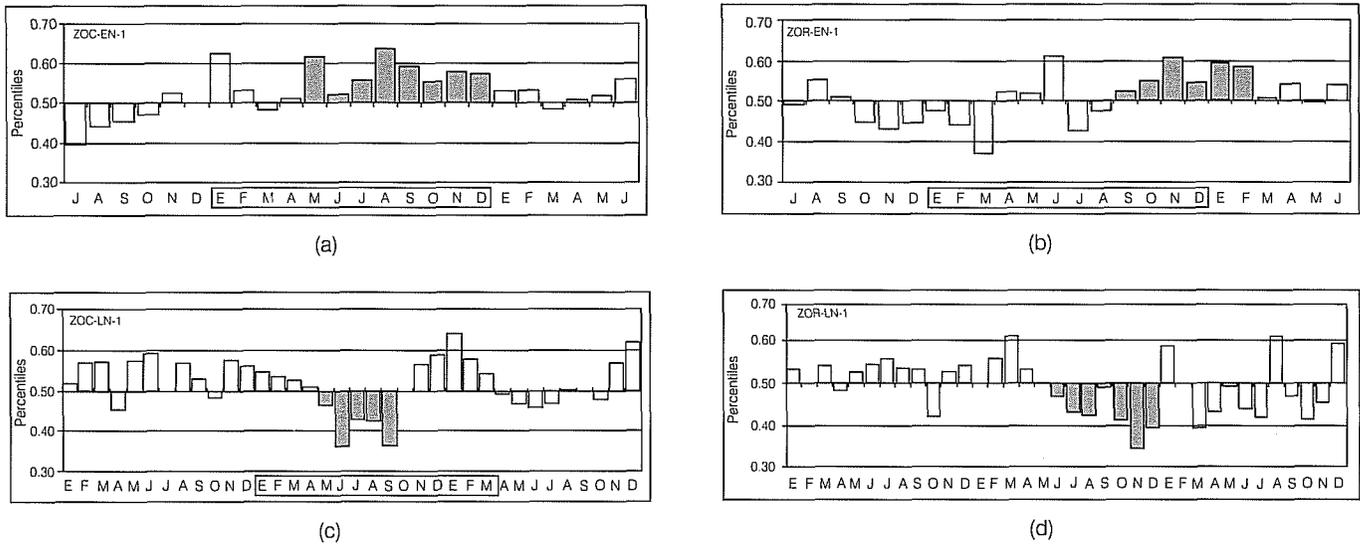
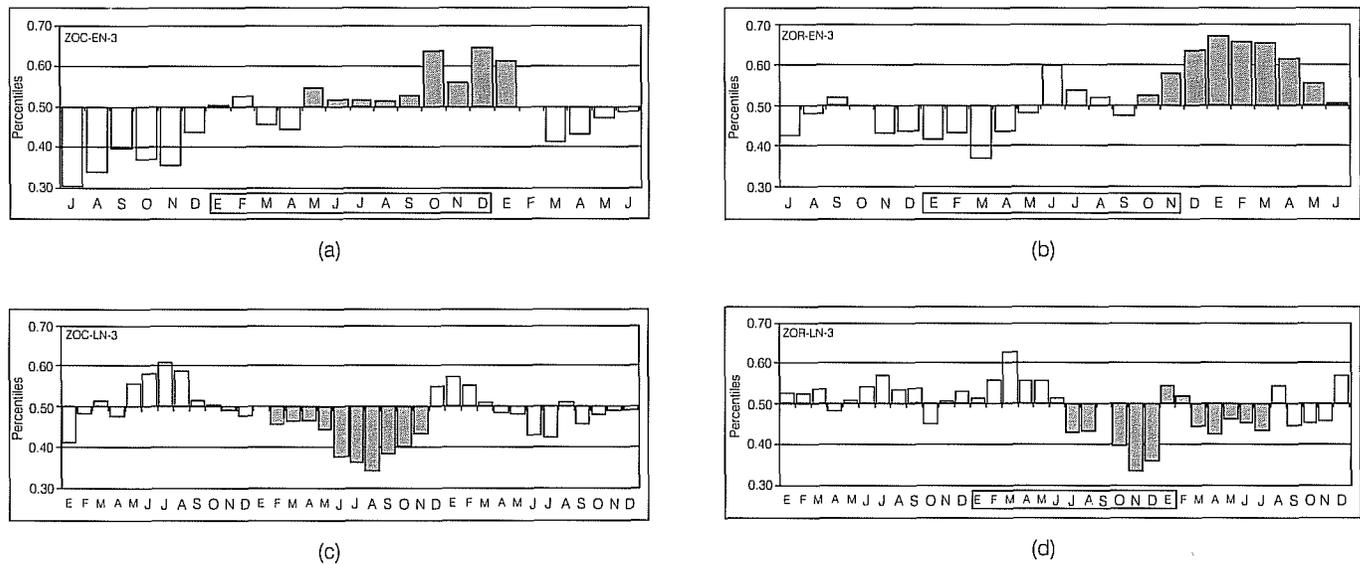


Ilustración 5. Periodos estacionales considerados para las zonas: a) ZOC-EN-3, b) ZOR-EN-3, c) ZOC-LN-3, d) ZOR-LN-3.

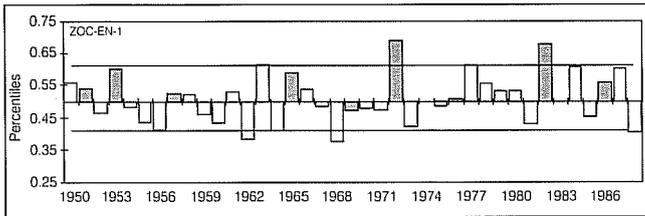


Cuadro 2. Periodo estacional de influencia de las fases extremas de ENOS en cada zona.

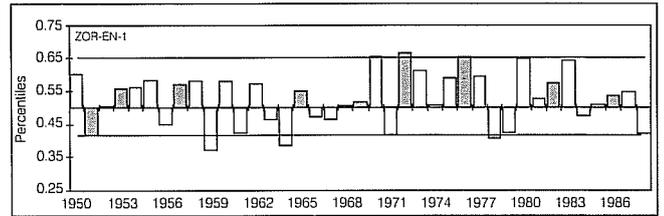
Región	Periodo estacional	Meses
ZOC-EN-1	mayo (0) – diciembre (0)	8
ZOR-EN-1	septiembre (0) – febrero (+)	6
ZOC-LN-1	mayo (0) – septiembre (0)	5
ZOR-LN-1	junio (0) – diciembre (0)	7
ZOC-EN-3	mayo (0) – enero (+)	9
ZOR-EN-3	octubre (0) – mayo (+)	8
ZOC-LN-3	febrero (0) – noviembre (0)	10
ZOR-LN-3	julio (0) – julio (+)	13

Niño, está asociado con condiciones de exceso de precipitaciones, mientras situaciones de déficit pluviométrico, se producen en sintonía con la ocurrencia de eventos La Niña en el Pacífico ecuatorial. Mientras las situaciones de mayor abundancia de precipitaciones siempre corresponden a condiciones El Niño, en las regiones consideradas no ocurre lo mismo con La Niña; sólo en la zona oriental, las situaciones de mayor escasez coinciden con la ocurrencia de La Niña, en tanto que en la zona occidental, la peor situación de sequía (año 1968 en ilustración 7c) no ocurrió en una condición de La Niña.

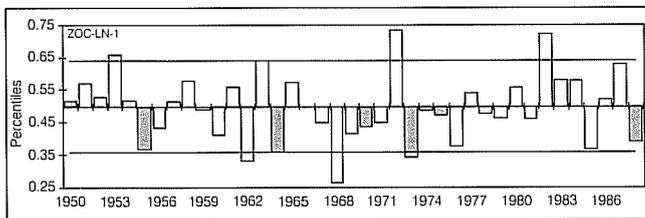
Ilustración 6. Representación gráfica de las series de IEN e ILN para las zonas: a) ZOC-EN-1, b) ZOR-EN-1, c) ZOC-LN-1, d) ZOR-LN-1.



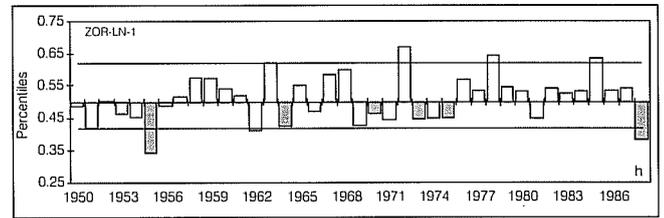
(a)



(b)

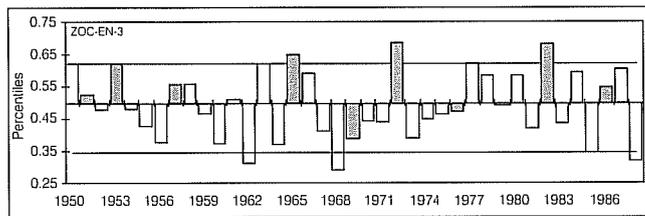


(c)

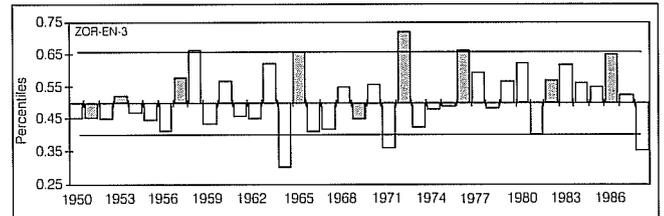


(d)

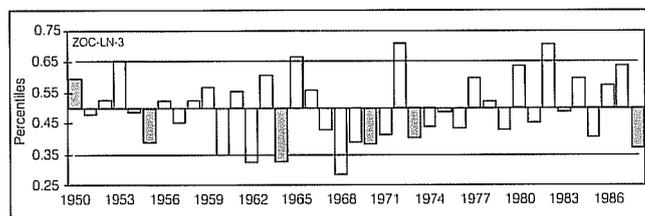
Ilustración 7. Representación gráfica de las series de IEN e ILN para las zonas: a) ZOC-EN-3, b) ZOR-EN-3, c) ZOC-LN-3, d) ZOR-LN-3.



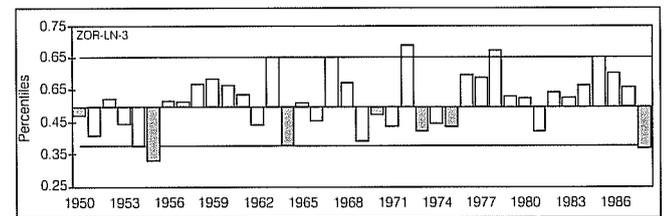
(a)



(b)



(c)



(d)

Cuadro 3. Parámetros utilizados en cada zona para la aplicación del modelo hipergeométrico.

Evento	Zona	N	k	n	m	P
El Niño	ZOC-EN-1	39	9	20	8	0.011
	ZOR-EN-1			26	8	0.096
	ZOC-EN-3			17	7	0.021
	ZOR-EN-3			19	7	0.045
La Niña	ZOC-LN-1	39	7	20	6	0.048
	ZOR-LN-1			17	7	0.001
	ZOC-LN-3			21	6	0.063
	ZOR-LN-3			16	7	0.001

Relaciones entre indicadores de ENOS y las condiciones extremas en el Cono Sur

Para caracterizar el fenómeno ENOS se han empleado indicadores tales como el índice de oscilación del sur, referido a la diferencia de presión atmosférica a nivel del mar entre Tahití y Darwin (Mosley, 2000), así como otros estimados sobre la base de las anomalías de la temperatura superficial del mar en diferentes regiones del Pacífico, entre los que destacan los índices EN1+2, EN4 y EN3,4 y EN3, este último comúnmente empleado para identificar influencias de ENOS en aspectos climáticos de América del Sur. Con el objeto de detectar las zonas

del Pacífico que pueden presentar mejores relaciones con la ocurrencia de situaciones de abundancia o escasez de precipitaciones en las regiones de influencia en el Cono Sur de América, se ha determinado el campo de correlación simultánea entre la TSM y los IEN e ILN para los meses correspondientes al periodo estacional detectado en cada región. Esta es una aproximación de aquellas regiones del océano Pacífico que pueden ejercer mayor influencia en los ciclos de abundancia y déficit de recursos para las áreas continentales analizadas.

Las ilustraciones 8 y 9 destacan aquellas zonas oceánicas cuyas correlaciones cruzadas lineales de desfase nulo son estadísticamente significativas para un nivel de confianza del 99%. En ellas se aprecian amplias zonas de correlaciones positivas para ambas situaciones extremas de ENOS alrededor de la región del Pacífico ecuatorial y sectores de menor envergadura con correlaciones negativas en el Pacífico sur occidental.

Existen interesantes correlaciones simultáneas entre las TSM y el comportamiento de las precipitaciones en las zonas con influencia de las fases extremas de ENOS en el Cono Sur de América. Estas correlaciones parecen más importantes, con coeficientes de regresión mayores en valor absoluto, en el caso de la zona occidental, junto al Pacífico, que en la oriental, junto al Atlántico. En todos los casos hay regiones del Pacífico con correlación positiva y negativa que exhiben valores del orden de ± 0.6 . Las correlaciones positivas se observan en la zona ecuatorial, pero además se detectan regiones en la parte sur occidental del Pacífico, alrededor de Nueva Zelanda, con valores negativos del coeficiente de correlación. Las zonas con coeficientes estadísticamente significativos son más amplias para el caso de El Niño que de La Niña; sin embargo, la peor condición se da con la zona oriental y El Niño, para la cual la mayor correlación en valor absoluto es del orden de 0.2 en pequeños sectores del océano Pacífico (ilustración 8b).

Ilustración 8. Campo de correlación simultánea entre TSM y el IEN e ILN para las zonas: a) ZOC-EN-1, b) ZOR-EN-1, c) ZOC-LN-1, d) ZOR-LN-1.

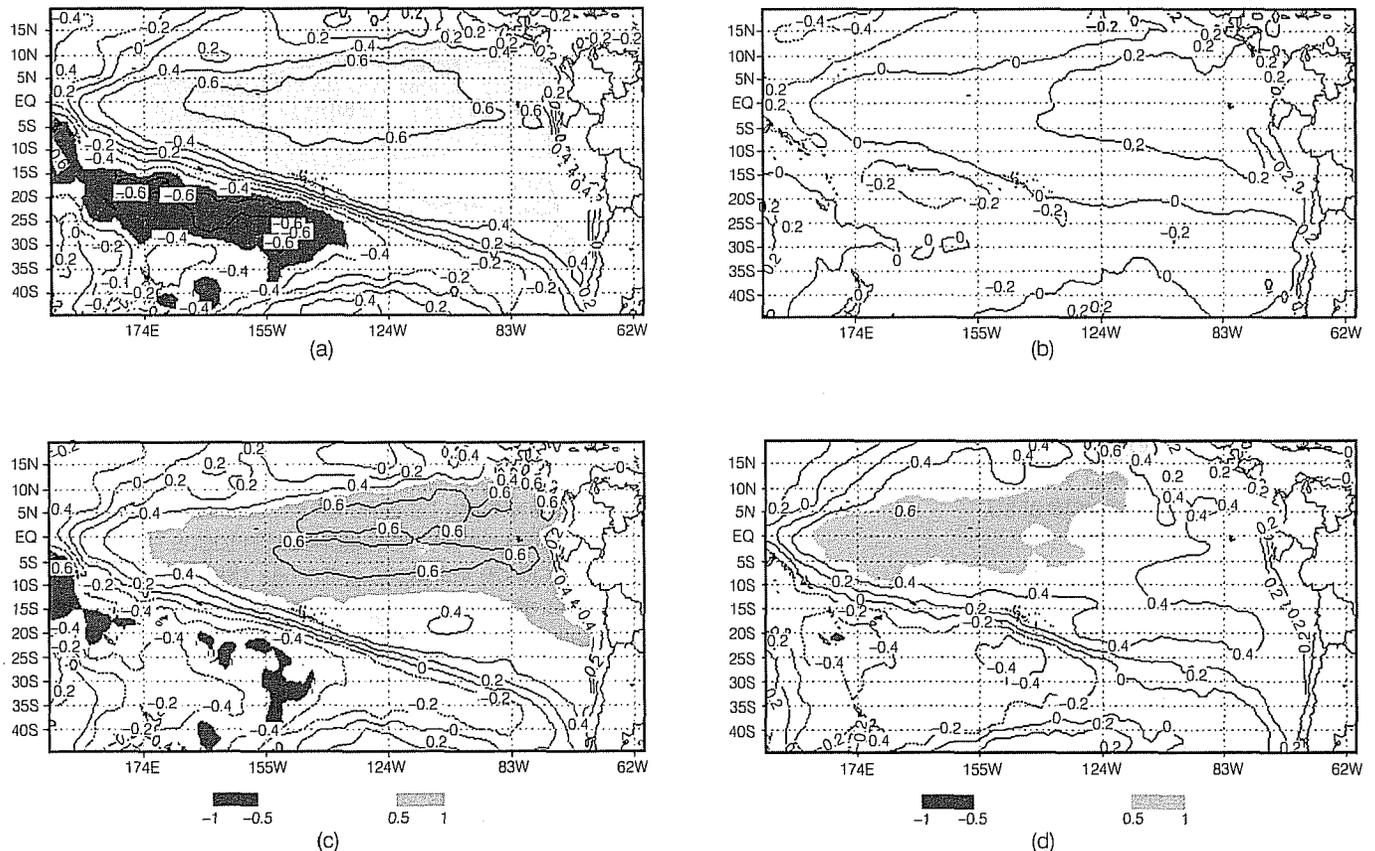
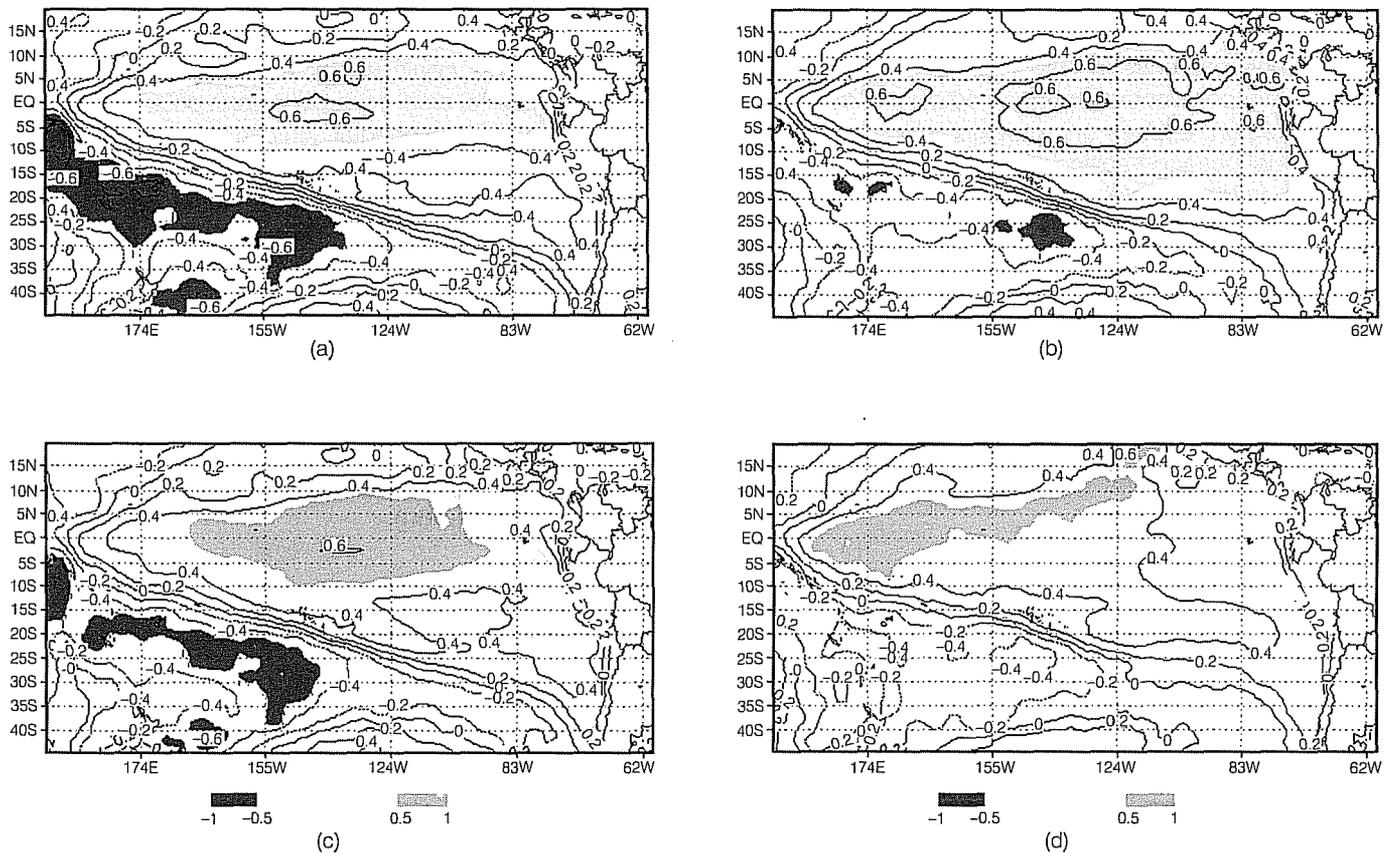


Ilustración 9. Campo de correlación simultánea entre TSM y el IEN e ILN para las zonas: a) ZOC-EN-3, b) ZOR-EN-3, c) ZOC-LN-3, d) ZOR-LN-3.



Para la zona occidental, la correlación entre la TSM y el IEN (ilustración 8a) sería superior a 0.6 en un amplio sector del Pacífico ecuatorial entre los 180 W y 85 W y los 10 N y 10 S, aproximadamente; mientras que se presenta inferior a -0.6 en una zona menos compacta entre 140 W y 160 E y entre 15 S y 30 S. Para el caso entre la TSM e ILN, en esta misma área también hay correlaciones mayores que 0.6 e inferiores a 0.6 alrededor de estas zonas, pero de menor extensión y desplazadas hacia el oeste en el ecuador y hacia el este al sur.

Conclusiones

Se han detectado dos zonas en el Cono Sur de América en las cuales las precipitaciones presentan una marcada influencia homogénea de los efectos de las fases extremas de ENOS. Tales regiones son muy similares para la influencia de El Niño y La Niña. Una de estas áreas abarca la zona central de Chile y su correspondiente sector andino en Argentina, con una extensión aproximada de

300,000 km². La otra se ubica en la costa atlántica, alrededor de la desembocadura del Río de La Plata, afectando un área de más de un millón de kilómetros cuadrados. Fuera de estas regiones, si bien no se descartan influencias de los eventos extremos de ENOS, no se tiene un comportamiento homogéneo que permita agruparlas de acuerdo con los criterios planteados.

En los mencionados territorios, la influencia de El Niño se traduce en condiciones pluviométricas significativamente altas y la de La Niña en situaciones de reducción en el régimen de precipitaciones. En todos los casos, la coincidencia de las fases extremas de ENOS con situaciones de abundancia y escasez son estadísticamente significativas, de manera que no pueden atribuirse al azar. Si bien en general se puede ver que la presencia de extremos en el Pacífico favorece condiciones extremas de precipitación en las zonas analizadas, no es posible establecer que todas las condiciones extremas de precipitación se pueden explicar como consecuencia de efectos de ENOS; por tanto, se observan situaciones de se-

quías meteorológicas no ligadas con la ocurrencia de La Niña o, similarmente, condiciones de exceso de recursos que no se pueden atribuir a El Niño (ilustraciones 6 y 7).

Existen coeficientes de correlación importantes entre las TSM en extensas zonas de Pacífico y las series cronológicas de IEN e ILN en las zonas de influencia homogéneas detectadas. Efectivamente, se ha encontrado una extensa zona del Pacífico ecuatorial central con coeficientes de correlación superiores a 0.6 y otra, de menor tamaño, algo más al sur y al occidente, con coeficientes menores que -0.6 para la zona occidental. Para la zona oriental en general, las zonas con coeficientes de correlación estadísticamente significativos son de menor tamaño en el caso de la ocurrencia de La Niña y presentan menores coeficientes aun en el caso del fenómeno El Niño. En todo caso, ellas indican que las variaciones de las precipitaciones mensuales en las regiones de influencia pueden ser explicadas, al menos parcialmente, por las variaciones que experimenta la temperatura superficial del mar en algunas zonas del Pacífico. Para ello es necesario, como etapa inmediata posterior a este trabajo, modelar el sistema con herramientas en donde se contemplen dichas relaciones, tanto en su dimensión espacial como temporal, a fin de que los modelos generados puedan utilizarse tanto para simulación de distintos escenarios posibles como para el pronóstico de corto plazo del régimen de precipitaciones.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Secretaría de Recursos Naturales y Desarrollo Sustentable de la República Argentina, y a la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de Chile por la información pluviométrica suministrada. Agradecen además los valiosos comentarios y sugerencias de los revisores del presente documento.

Recibido: 10/01/2001
Aprobado: 08/06/2001

Referencias

- Chiew, F.H., T.C. Piechota, J.A. Dracup y T.A. McMahon, "El Niño/Southern Oscillation and Australian Rainfall, Stream Flow and Drought: Links and Potential for Forecasting", *Journal of Hydrology*, vol. 204, 1998, pp. 138-149.
- Dracup, J.A. y E. Kahya, "The Relationships between U.S. Stream Flow and La Niña Events", *Water Resources Research*, vol. 30, núm. 7, 1994, pp. 2133-2141.
- Fernández, H.W. y B. Fernández, "Identificación y caracterización de sequías meteorológicas anuales en el Cono Sur de América", *Memorias del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica "Cordoba 2000"*, tomo II, IAHR, Argentina, Córdoba, del 22 al 27 octubre de 2000, pp. 51-60.
- Grimm, A.M., V.R. Barros y M.E. Doyle, "Climate Variability in Southern South America Associated with El Niño and La Niña Events", *Journal of Climate*, vol. 13, 2000, pp. 35-58.
- Kahya, E. y J.A. Dracup, "U.S. Stream Flow Patterns in Relation to the El Niño/Southern Oscillation", *Water Resources Research*, vol. 29, 1993a, pp. 2491-2503.
- Kahya, E. y J.A. Dracup, "The Influences of Type 1 El Niño and La Niña Events on Stream Flows in the Pacific Southwest of the United States", *Journal of Climate*, vol. 7, 1993b, pp. 965-976.
- Kirkyla, K.I. y S. Hameed, "Harmonic Analysis of the Seasonal Cycle in Precipitation over the United States: A Comparison between Observations and a General Circulation Model", *Journal of Climate*, vol. 2, 1989, pp. 1463-1475.
- McKee, T.B., N.J. Doesken y J. Kleist, *Drought Monitoring with Multiple Time Scales. 9th Conference on Applied Climatology*, Dallas, Texas, del 15 al 20 de enero de 1993, pp. 233-236.
- Montecinos, A., A. Díaz y P. Aceituno, "Seasonal Diagnostic and Predictability of Rainfall in Subtropical South America Based on Tropical Pacific SST", *Journal of Climate*, vol. 13, 2000, pp. 746-758.
- Mosley, M.P., "Regional Differences in the Effects of El Niño and La Niña on Low Flows and Floods", *Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 45, 2000, pp. 249-267.
- Moss, M.E., C.P. Pearson, A.I. Mc Kerchar, "The Southern Oscillation Index as a Predictor of the Probability of Low Stream Flows in New Zealand", *Water Resources Research*, vol. 30, 1994, pp. 2717-2723.
- Nigam, S., M.Y. Barlow y E.H. Berbery, "Analysis Links Pacific Decadal Variability to Drought and Stream Flow in United States", *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, vol. 80, 1999, pp. 621-625.
- NOAA-CIRES, *1998 Texas Drought*, 1999, <http://www.cdc.noaa.gov/txdrought/>.
- Piechota, T.C. y J.A. Dracup, "Drought and Regional Hydrologic Variation in the United States: Associations with the El Niño-Southern Oscillation", *Water Resources Research*, vol. 32, 1996, pp. 1359-1373.
- Philander, S.G., *El Niño y La Niña and the Southern Oscillation*, Academic Press, San Diego, California, 1990, 293 pp.
- Rasmusson, E.M. y T.H. Carpenter, "Variations In Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associated with the Southern Oscillation/El Niño", *Monthly Weather Review*, vol. 110, 1982, pp. 355-384.
- Rasmusson, E. M. y T.H. Carpenter, "The Relationship Between Eastern Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures and Rainfall over India and Sri Lanka", *Monthly Weather Review*, vol. 111, 1983, pp. 517-528.

Ropelewski, C.F. y M.S. Halpert, "North American Precipitation and Temperature Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation ENSO", *Monthly Weather Review*, vol. 114, 1986, pp. 2352-2362.

Ropelewski, C.F. y M.S. Halpert, "Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation", *Monthly Weather Review*, vol. 115, 1987, pp. 1606-1626.

Ropelewski, C.F. y P.D. Jones, "An Extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index", *Monthly Weather Review*, vol. 115, 1987, pp. 2161-2165.

Sun, H.B. y D.J. Furbish, "Annual Precipitation and River Discharges in Florida in Response to El Niño and La Niña Sea Surface Temperature Anomalies", *Journal of Hydrology*, vol. 199, 1997, pp. 74-87.

Yevjevich, V., *Probability and Statistics in Hydrology*, Water Resources Publications, Fort Collins, Estados Unidos, 1972.

Abstract

Fernández, H.W. & B. Fernández L., "The Influence of ENSO in the Precipitation Regime in Southern South America", *Hydraulic Engineering in Mexico (in Spanish)*, vol. XVII, num. 3, pages 5-16, July-September, 2002.

El Niño Southern Oscillation (ENSO) phenomenon has been statistically related to several hydroclimatic extremes all around the world. In this paper, several zones in the continental region of Southern South America are identified. These zones present teleconnections between the extremes phases of ENSO and the precipitation phenomenon characterized through the standardized precipitation index. The methodology is based on the estimation of the first harmonic and the properties of length and phase of the resulting vector, and in the analysis of vectorial coherence between both phenomena. In order to estimate probabilities and to verify the significance levels of the relationship found, a test based on the hypergeometric distribution is used. Also, some regions in the Pacific Ocean that present the best statistical correlation between the sea surface temperature (SST) anomalies and the time series of index of precipitation in the zones of influence are presented.

Key words: El Niño, La Niña, Precipitations, Teleconnections, Meteorological Extremes, South America, SST anomalies.

Dirección institucional de los autores:

Hugo William Fernández

Universidad Nacional de San Juan
Facultad de Ingeniería
Instituto de Investigaciones Hidráulicas
Urquiza 91 (N) – Capital - CP 5400 – San Juan – República Argentina.
Teléfono: 54 0264 4272 251
Fax: 54 0264 4272 251
Correo electrónico: hferna@unsj.edu.ar

Bonifacio Fernández Larrañaga

Pontificia Universidad Católica de Chile
Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental
Vicuña Mackena 4860, Santiago de Chile, Casilla 306, Correo22, Chile.
Teléfono: 56 2 6864 227
Fax: 56 2 686 5876
Correo electrónico: bfernand@ing.puc.cl