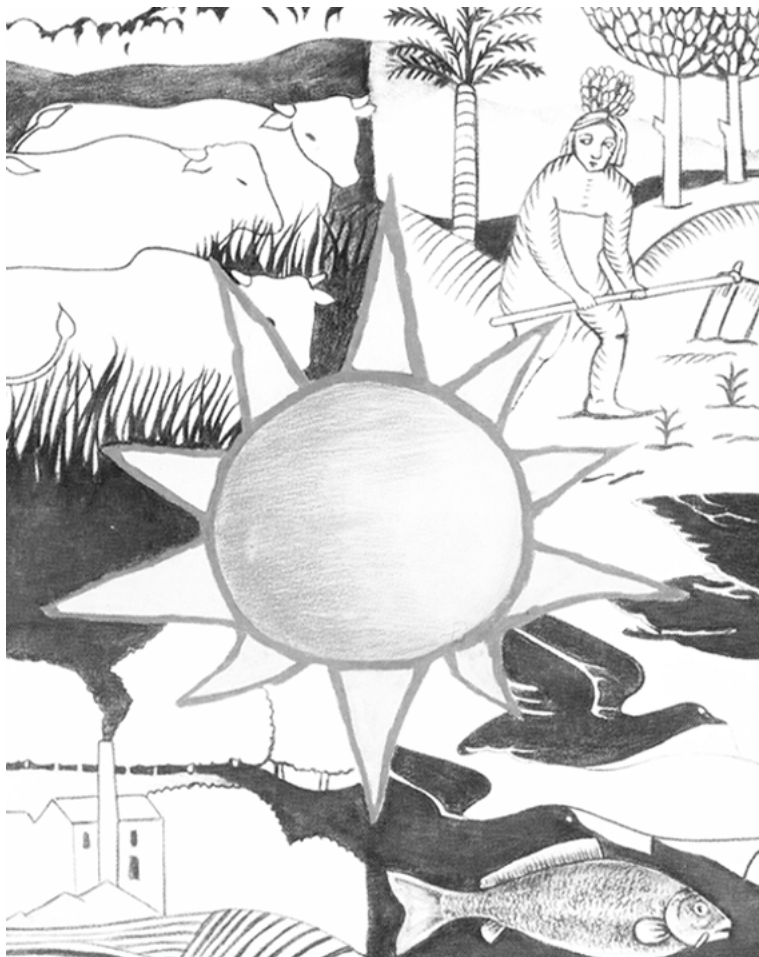


EFFECTO DEL ENSO EN LA PRECIPITACIÓN DE CHILLÁN, CHILE: UNA APROXIMACIÓN MEDIANTE WAVELETS

ENSO influence on precipitation of Chillan, Chile: an approach using wavelets

Diego Rivera, Mario Lillo & José Luis Arumí



Laboratorio de Hidrología Ambiental. Universidad de Concepción. Avenida Vicente Méndez 595, Chillán, Chile. Correo electrónico: dirivera@udec.cl.

RESUMEN

El fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) afecta fuertemente la variabilidad interanual de las condiciones hidroclimáticas. Este artículo presenta un análisis, en el plano tiempo-frecuencia, del efecto del ENSO en el régimen de precipitaciones de Chillán. La Transformada Wavelet es una transformación lineal que tiene una gran utilidad en área del procesamiento de señales, donde una de sus principales aplicaciones consiste en separar conjuntos de datos en componentes de frecuencia, que luego se representan en escalas comunes. La Transformada Wavelet fue aplicada a tres series hidroclimáticas: Precipitación, Temperatura Superficial del Mar en la región El Niño 3.4 y Southern Oscillation Index (SOI), encontrándose una alta correlación en períodos de 4 a 6 años, asociados a eventos El Niño. La ventaja del método presentado es que permite el análisis de los patrones temporales en las series de datos, los cuales no pueden ser detectados mediante enfoques clásicos.

Palabras Clave: Precipitación, ENSO, Transformada wavelet, Chile

ABSTRACT

El Niño Southern Oscillation (ENSO) strongly affects the interannual variability of hydroclimatic conditions. This article presents, in the time-frequency plane, the ENSO effect on precipitation patterns in Chillan. The wavelet transform is a linear transformation widely used in signal processing. Its main application is the separation of data sets on frequency components, which are represented at common scales. The wavelet transform was applied to three hydroclimatic series: Precipitation, Sea Surface Temperature in El Niño3.4 region and the Southern Oscillation Index (SOI). High correlation was founded in periods from 4 to 6 years, associated to El Niño events. The advantage of the presented approach lies on the capability to analyze temporal patterns in time series, which can not be detected using classical approaches.

Keywords: Precipitation, ENSO, wavelet transform, Chile

INTRODUCCIÓN

El Niño es uno de los fenómenos climáticos que influye en las variables hidrológicas, especialmente para la actividad agrícola y pesquera, (Waylen & Poveda 2002, Meza 2005). Este término fue inicialmente aplicado a una débil y cálida corriente anual que se desplaza hacia el sur a lo largo de las costas de Ecuador, Perú y Chile, y está asociado a temporadas inusualmente cálidas cada ciertos años. Sin embargo, el calentamiento en la costa está frecuentemente asociado a un calentamiento del océano más extensivo, a escala del Pacífico, con una conexión a patrones climáticos anómalos a escala global (Trenberth 1997). La componente atmosférica relacionada a El Niño es llamada Oscilación del Sur (SO) y el fenómeno donde el océano y la atmósfera colaboran es llamado El Niño-Southern Oscillation (ENSO). No existe una única definición para definir eventos El Niño (Waylen & Poveda 2002, Trenberth 1997). Trenberth (1997) señala que puede considerarse que se está frente a un fenómeno del Niño si el promedio móvil de 5 meses de la Temperatura superficial del mar (SST) en la región Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°W-170°W) excede 0,4 °C por 6 o más meses. Con esta definición, El Niño ocurre un 31% del tiempo y el fenómeno inverso, i.e. La Niña, ocurre un 23% del tiempo (Trenberth 1997).

En el Valle Central de Chile, para mantener los incrementos en producción de cultivos de alto valor, la agricultura utiliza de manera intensiva recursos hídricos superficiales y subterráneos, los cuales son altamente dependientes del régimen de precipitaciones (Arumí et al. 2008). Dado que en presencia de eventos El Niño y La Niña en la Zona Central de Chile (30°-41°) se observa una tendencia a que ocurran precipitaciones sobre y bajo el promedio, respectivamente (Waylen & Poveda 2002, Barnston et al. 1999, Quintana 2004, Grimm

et al. 2000, Fernández & Fernández 2002, Montecinos & Aceituno 2000), el conocimiento del rango o dominio interanual de las variables hidroclimáticas y la reducción de la incerteza asociada a eventos hidrológicos son importantes en el momento de planificar y manejar los recursos hídricos en la actividad agrícola (Waylen & Poveda 2002, Meza & Wilks 2004, Meza 2005, Ferreyra et al. 2001).

El análisis de las series de tiempo (ST) puede tener, además del análisis estadístico tradicional y de tendencias, un objetivo exploratorio, sin considerar a priori efectos o causas, si no más bien el ánimo de descubrir propiedades y procesos (Maraun & Kurths 2004). El uso de herramientas basadas en la Transformada Wavelet permite el análisis de las fluctuaciones en series de tiempo de variables hidrológicas y los patrones de variación en la interrelación (Labat 2005, Labat et al. 2005).

Dado lo anterior, este artículo tiene por objetivo presentar las aplicaciones de la Transformada Wavelet y del concepto de coherencia en el análisis de series hidroclimáticas. Como estudio de caso analizan las series diarias de precipitación agregadas mensualmente en Chillán, Chile, y SST para la región Niño 3.4 y Track 1 (valores de temperatura superficial del mar en la costa oeste de América entre los paralelos 20°S y 10°N). A partir de los resultados, se muestra la aplicabilidad de técnicas no convencionales de análisis exploratorio de datos en la extracción de información en tiempo y frecuencia contenidas en las series hidroclimáticas.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Transformada Wavelet

La Transformada Wavelet (TW) es una transformación lineal que tiene una gran utilidad

en el área del procesamiento de señales, donde una de sus principales aplicaciones consiste en separar un conjunto de datos en componentes de distinta frecuencia, que luego son representados en escalas comunes. Definiciones matemáticas rigurosas pueden encontrarse en Mallat (1999) y ejemplos ilustrativos a series geofísicas pueden encontrarse en Grinsted et al. (2004), Labat (2005), Kumar & Foufoula-Georgiou (1997), Li et al. (2002), Lau & Weng (1995), Percival & Walden (2000).

La TW de una función $f(t)$ es la descomposición de $f(t)$ en un conjunto de funciones $\psi_{s,\tau}(t)$ que forman una base ortonormal (wavelet). Formalmente:

$$Wf(s,\tau) = \int f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt \quad (1)$$

Para poder obtener esta base $\psi_{s,\tau}(t)$ se realizan traslaciones (τ) y cambios de escala (s) a una misma función denominada wavelet madre ($\psi(t)$) según la ecuación (2):

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (2)$$

La transformada wavelet discreta (DWT) es una poderosa herramienta matemática para el análisis multirresolución mediante una representación escala-frecuencia de señales no-estacionarias (Mallat et al. 1998) y es la herramienta natural para el análisis de series de tiempo discretas (Percival & Walden 2000). La DWT permite la reconstrucción perfecta de la serie original; así como la de-correlación de la serie de tiempo (Percival & Walden 2000).

En la práctica, la DWT se reduce a la aplicación de filtros paso alto y paso bajo que degradan la señal en un factor de dos, en cada uno de los niveles jerárquicos (Mallat 1999), donde H y L son los filtros de paso alto y bajo

respectivamente. $\downarrow 2$ representa la degradación de la señal en un factor dos y la salida a_{j+1} y d_{j+1} de los filtros está dada por la ecuación 3:

$$a_{j+1}(p) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} L[n-2p] a_j[n] \quad (3a)$$

$$d_{j+1}(p) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} H[n-2p] a_j[n] \quad (3b)$$

Los elementos a_j son usados para obtener el siguiente nivel de la transformación (escala), y se les denomina función de escalamiento. Los elementos d_j , llamados coeficientes Wavelet, corresponden a la salida de la transformada. $L[n]$ y $H[n]$ son los coeficientes de los filtros de paso bajo y alto respectivamente. Se asume que en la escala $j+1$ existe, solamente, la mitad de elementos de a y d que en la escala j , por lo que la Transformada Wavelet discreta puede ser aplicada hasta que existan dos elementos a_j para ser analizados.

Dadas dos series de tiempo X e Y , con transformadas wavelet $w_n^X(s)$ y $w_n^Y(s)$ donde n es el índice temporal y s es la escala, el espectro de la Transformada Wavelet cruzada (XWT), donde $(\cdot)^*$ corresponde al complejo conjugado, es (Torrence y Webster, 1999):

$$w_n^{XY}(s) = w_n^X(s) w_n^{Y*}(s) \quad (4)$$

La coherencia cuadrática (WCT) es definida como el valor absoluto del cuadrado del espectro de la XWT suavizada, normalizada por el espectro de potencia de la XWT suavizada como (Torrence & Webster 1999):

$$R_n^2 = \frac{\langle |s^{-1}w_n^{XY}(s)|^2 \rangle}{\langle s^{-1}|w_n^X(s)|^2 \rangle \langle s^{-1}|w_n^Y(s)|^2 \rangle} \quad (4)$$

donde $\langle \rangle$ indica el suavizado en tiempo y escala, y el factor s^{-1} es usado para obtener densidad de energía. Con estas definiciones $0 \leq R_n^2 \leq 1$. Dado que la Transformada Wavelet conserva la varianza, la coherencia es una precisa representación de la covarianza normalizada entre dos series de datos punto a punto (Torrence & Compo 1998, Torrence & Webster 1999). Permite además, explorar correlaciones, aún cuando la potencia de cada señal en una ventana tiempo-frecuencia sea baja. Sin embargo, además de la potencia de las señales, es necesario considerar los gradientes de energía en el tiempo.

La TW producida por un proceso mezclado es un número aleatorio. Así, aún cuando dos procesos sean independientes, aparecerán valores de coherencia distintos de cero. Por ello es necesario formular una hipótesis nula de la forma «los procesos no son coherentes» y derivar una prueba de significancia estadística (Maraun & Kurths 2004). El nivel de significancia estadística de la WCT es estimada mediante simulación de MonteCarlo, contrastando los valores de coherencia de las series estudiadas con espectros de series aleatorias (Grinsted et al. 2004, Maraun & Kurths 2004). Sin embargo, dadas estas características aleatorias, es necesario separar los «falsos-positivos», i.e. zonas en la representación tiempo-frecuencia donde se observa una alta coherencia (debido posiblemente a co-oscilaciones de las series, correlaciones intrínsecas de la TW o el efecto de muestreo múltiple), pero sin un significado físico (Schaeffli et al. 2007). Este problema aparece principalmente en el método desarrollado por Torrence & Webster (1999). Maraun et al. (2007) y Maraun & Kurths (2004) desarrollaron un método de significancia estadística que per-

mite disminuir, pero no eliminar, los falsos-positivos. Este método considera un análisis del tamaño y la geometría de las zonas con alta correlación para decidir si corresponde a zonas significativas, o bien falsos-positivos.

Aplicaciones de la Transformada Wavelet a variables biofísicas

El análisis de Fourier tiene limitaciones para analizar señales que se alejan de las condiciones de estacionalidad o características intermitentes, por lo cual es necesario un alto número de coeficientes de Fourier para captar estructuras que son visibles en algunos intervalos e invisibles en otras (Labat 2005). Una de las características de esta herramienta es el análisis localizado de los cambios de una serie de tiempo a diferentes escalas, más aún si se considera que para propósitos exploratorios es de mayor interés la evolución temporal de los descriptores estadísticos, como el promedio, más que el promedio en sí mismo (Percival & Walden 2000). El Transformada Wavelet ha sido desarrollado para el análisis de este tipo de señales, comunes en geofísica e hidrología. Por ejemplo, Luque (2003) analizó los ciclos en el contenido en materia orgánica del sedimento del Lago de Sanabria (España).

Además de la aplicación de la transformada wavelet, se tienen dos herramientas para la comparación y correlación entre dos series en tiempo y frecuencia (Torrence & Webster 1999, Torrence & Compo 1998): la transformada cruzada de wavelet (cross wavelet transform, XWT) y la medida de coherencia entre dos series transformadas mediante wavelet continua (wavelet coherency, WCT). Detalles sobre estas herramientas pueden encontrarse en Maraun & Kurths (2004), Maraun et al. (2007) y Schaeffli et al. (2007). Ejemplos de aplicación de estas herramientas a series geofísicas son el estudio de la relación entre

el Índice de Oscilación del Ártico y la extensión del hielo en el Báltico (Grinsted et al. 2004), el análisis de las series de descarga en ríos (Labat et al. 2004, 2005, 2008), el análisis de procesos hidrológicos (Schaeffli et al. 2007), el análisis de series de precipitación (Markovic & Koch 2005) y el análisis de series de calidad de agua (Kang & Lin 2007).

El Niño-Southern Oscillation (ENSO)

La literatura es amplia respecto a las características y capacidades predictivas de eventos hidroclimáticos a partir de las series de SST y el Índice de Oscilación del Sur (Southern Oscillation Index, SOI) (Barnston et al. 1999). En efecto, es posible predecir un evento El Niño utilizando la SST, la que a su vez es posible pronosticar con una anticipación de entre tres y seis meses (Waylen & Poveda 2002; Barnston et al. 1999). Además, los cambios asociados en la amplitud, fase y magnitud del ENSO están asociados a la variabilidad de la estacionalidad de la SST (Pezzulli et al. 2005).

Dado que el ENSO influencia el régimen de precipitaciones, existe una extensa y variada literatura respecto a técnicas y aplicaciones que permitan predecir y regionalizar sus posibles efectos. Algunos ejemplos del uso de análisis de armónicos para series de precipitación y eventos El Niño se encuentran en Ropelewski & Halpert (1986, 1987), Chiew et al. (1998), Grimm et al. (2000), Fernández & Fernández (2002), Ntale & Gan (2004). Los trabajos de Stone et al. (1996a), Quintana (2004), Dutta et al. (2006), Hanson et al. (2006) aplican técnicas estadísticas para definir asociaciones entre el régimen de precipitaciones e indicadores del ENSO, e.g., SOI y SST (Hammer et al. 1996 Meza & Wilks 2004).

Además del establecimiento de correlaciones o asociaciones entre el ENSO y variables

hidroclimáticas, desde el punto de vista práctico, es necesario disponer de herramientas predictivas que permitan un adecuado manejo agrícola, industrial y urbano, con el fin de mitigar o prevenir daños potenciales a personas y/o cultivos. En efecto, Waylen & Poveda (2002) señalan que la reducción en la incerteza de eventos extremos y de la variabilidad interanual será siempre valorada por agricultores y planificadores. Por ejemplo, Ruiz et al. (2007), aplicando técnicas estadísticas, pronosticaron la descarga en ríos de Australia utilizando valores de SST; a su vez Montecinos et al. (2000) desarrollaron un método de predicción de precipitaciones dependiente de la SST. Respecto a la actividad agrícola, Stone et al. (1996b) pronosticaron el número de heladas utilizando las fases del SOI (Stone et al. 1996a).

La predicción de eventos o de la variabilidad climática asociada al ENSO siempre será útil a la hora de planificar (Meza & Wilks 2004, Meza 2005). La estimación de respuestas asociadas a distintos escenarios climáticos permiten evaluar el riesgo, caracterizar la vulnerabilidad de los sistemas de producción asociados a el ENSO (Ferreira et al. 2001) y definir estrategias de manejo para enfrentar estos eventos (Cabrera et al. 2007). En efecto, los modelos climáticos pueden pronosticar SST entre 3 a 6 meses de anticipación (Waylen & Poveda 2002) o estacional, como por ejemplo la precipitación (Montecinos et al. 2000).

Aplicaciones wavelets a datos relacionados al ENSO

Luego de que Torrence & Webster (1999) introdujeran el concepto de coherencia para el análisis de correlación temporal y de frecuencias para dos series, mostrando la asociación entre las series de SST en la región Niño3.4 y la precipitación en India. El uso de WTC pue-

de considerarse un estándar en el análisis de asociación entre dos series de tiempo de variables relacionadas, e.g., régimen de precipitación y fenómenos climáticos como el ENSO o la North Atlantic Oscillation (NAO) (Labat et al. 2005, Andreo et al. 2006, Coulibaly 2006, Zhang et al. 2007, Kang & Lin 200, Massei et al. 2007, Kwon et al. 2008, Aldrian & Djamil 2008), destacándose las capacidades de pronóstico (Wang & Wang 1996, Zhang et al. 2007). Fagel et al. (2008) analizaron mediante wavelets los sedimentos del lagos del sur de Chile para evaluar el ENSO durante los últimos 600 .

MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos de precipitación corresponden a registros diarios desde enero de 1969 a diciembre de 2005, medidos en la Estación Agrometeorológica de la Universidad de Concepción, Campus Chillán, Chile (Latitud 36° 34', Longitud 72° 06', Altitud 144 msm). La serie analizada corresponde a una agregación mensual. Las series de SST y SOI fueron obtenidas de Climate Prediction Center del National Weather Service, USA.

La secuencia de eventos El Niño considerada es 1969-1970, 1972-1973, 1976-1977, 1982-1983, 1986-1987, 1991-1992, 1997-1998, 2001-2003 (Pezzulli et al. 2005, Fernández & Fernández 2002, Gu & Philander 1995, Ntale & Gan 2004, Garcés-Vargas et al. 2005, de la Casa & Ovando 2006).

Se aplicó la TW a la series de precipitación, Temperatura superficial del mar e Índice de Oscilación del Sur (SOI) (Fig. 1). A cada serie le fue aplicada la Transformada Wavelet redundante usando funciones biortogonales 3.5. La TW redundante corresponde a una DWT sin submuestreo en cada nivel de degradación. Después de aplicar la TW a la serie original, el proceso de filtrado genera dos se-

ries, $d1$ y $a1$, de igual longitud que la serie original, lo cual es una ventaja de la Transformada Wavelet redundante. Las series d contienen información de alta frecuencia (detalles) y las series a contiene información de baja frecuencia (fondo o tendencias). La serie de alta frecuencia es análoga a una serie de diferencias entre dos datos sucesivos, i.e. variaciones inter-mensuales. Por su parte la serie de baja frecuencia es análoga a aplicar un promedio móvil entre dos o más datos sucesivos, con lo cual se obtienen tendencias. A medida que aumenta el nivel de degradación, la longitud del promedio móvil aumenta, es decir, se promedian más meses.

El siguiente nivel de degradación se obtiene aplicando a la serie $a1$ la TW para obtener las series $a2$ y $d2$. Luego se repite el proceso hasta el octavo nivel. Dado que se obtiene reconstrucción perfecta se verifica que $d1+d2+\dots+d8+a8 = X$, donde X es la serie original. Se consideraron 8 niveles de degradación ($2^8 = 2^{56}$), ya que es el valor más cercano a la longitud de las series analizadas (492 meses).

Los espectros de potencia (ver Percival & Walden 2000) corresponden a una representación del contenido energético de la serie para diferentes frecuencias, los cuales fueron estimados utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Altos valores de potencia implican que la frecuencia asociada determina las variaciones; sin embargo, dado que una serie contiene más de una frecuencia, se deben analizar los valores *peak* de los espectros para identificar las frecuencias o períodos principales. Por ejemplo, en una serie de SST, un alto valor de potencia asociada a períodos de 10 años, implica que además de las variaciones anuales y estacionales, existen variaciones en las tendencias decadales.

Para aplicar la WCT puntual se utilizó la metodología desarrollada en Torrence & Compo (1998) y Torrence & Webster (1999) implementada en Matlab.

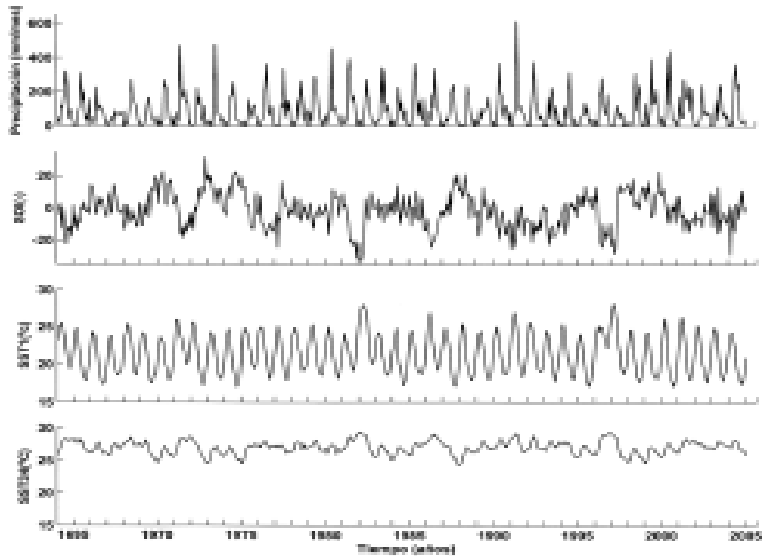


FIGURA 1. SERIES TEMPORALES DE PRECIPITACIÓN MENSUAL (PP) SOUTHERN OSCILLATION INDEX (SOI) Y TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR EN LAS REGIONES NIÑO34 (SST34) Y TRACK1 (SST1).

Time series for monthly precipitation, Southern Oscillation Index (SOI) and Sea Surface Temperature at El Niño3.4 (SST34) region and Track1 (SST1).

RESULTADOS

Las series de alta frecuencia corresponden a una serie de datos que sólo contiene variaciones en pasos de tiempo de días, semanas y meses. Las series de alta frecuencia contienen variaciones a escalas de temporadas, años y décadas. Dado que las aplicaciones de la TW son sucesivas, mientras mayor es el nivel de degradación, la escala de tiempo analizada aumenta.

Para la serie de precipitación se observan claros ciclos estacionales de 6 y 12 meses (Fig. 2A). Estos ciclos se observan también en los espectros de potencia (Fig. 3A). Sin embargo, la serie d8, además de la variación estacional, muestra una tendencia cíclica en períodos de 20 años. Es interesante notar que se observan oscilaciones de alta amplitud, muy localiza-

das en tiempo, a intervalos cuasi-regulares, en la serie d1.

Para las serie de Temperatura superficial del mar e Índice de Oscilación del Sur, además de los ciclos anuales, se observan períodos de 4 y 6 años (Fig. 3B y Fig. 3C), que son correspondientes con los reportados para el ENSO (e.g., Gu y Philander 1995, Torrence & Compo 1998, Torrence & Webster 1999, Waylen & Poveda 2002). Se observa también el ciclo de 20 años. La serie a8 (Fig. 2B y Fig. 2C), muestra un comportamiento relativamente plano con algunos aumentos en la amplitud, pero sin una clara regularidad.

Para explorar la asociación entre SST, SOI y PP, se aplicó la WCT a estas series (Fig. 4). Es clara la alta correlación en la banda entre 8 y 16 meses entre las series de precipitación y temperatura del mar (Fig. 2B y Fig 2C). Estos

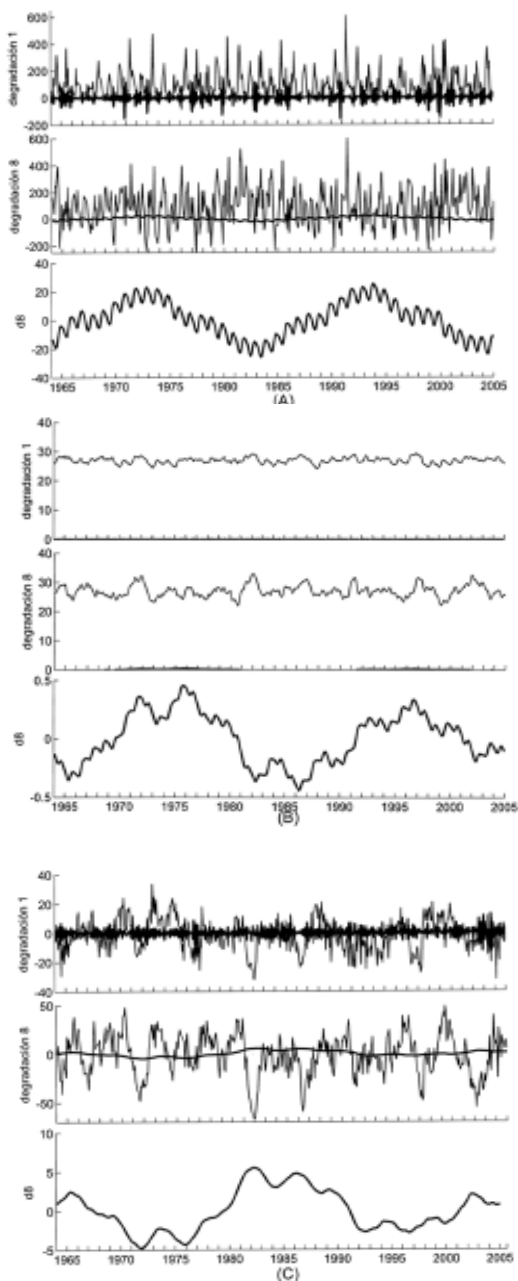


FIGURA 2. DESCOMPOSICIÓN MEDIANTE WAVELET REDUNDANTE DE (A) PRECIPITACIÓN MENSUAL (B) TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR EN LA REGIÓN NIÑO 3.4 (C) ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR. LA LÍNEA GRUESA CORRESPONDE A LAS COMPONENTES DE ALTA FRECUENCIA (SERIES A) Y LA LÍNEA DELGADA A COMPONENTES DE BAJA FRECUENCIA (SERIES D).

Redundant Wavelet decomposition of (A) monthly precipitation (B) Sea Surface Temperature at El Niño 3.4 (c) Southern Oscillation Index. Thick line correspond to high frequency components and thin line correspond to low frequency components.

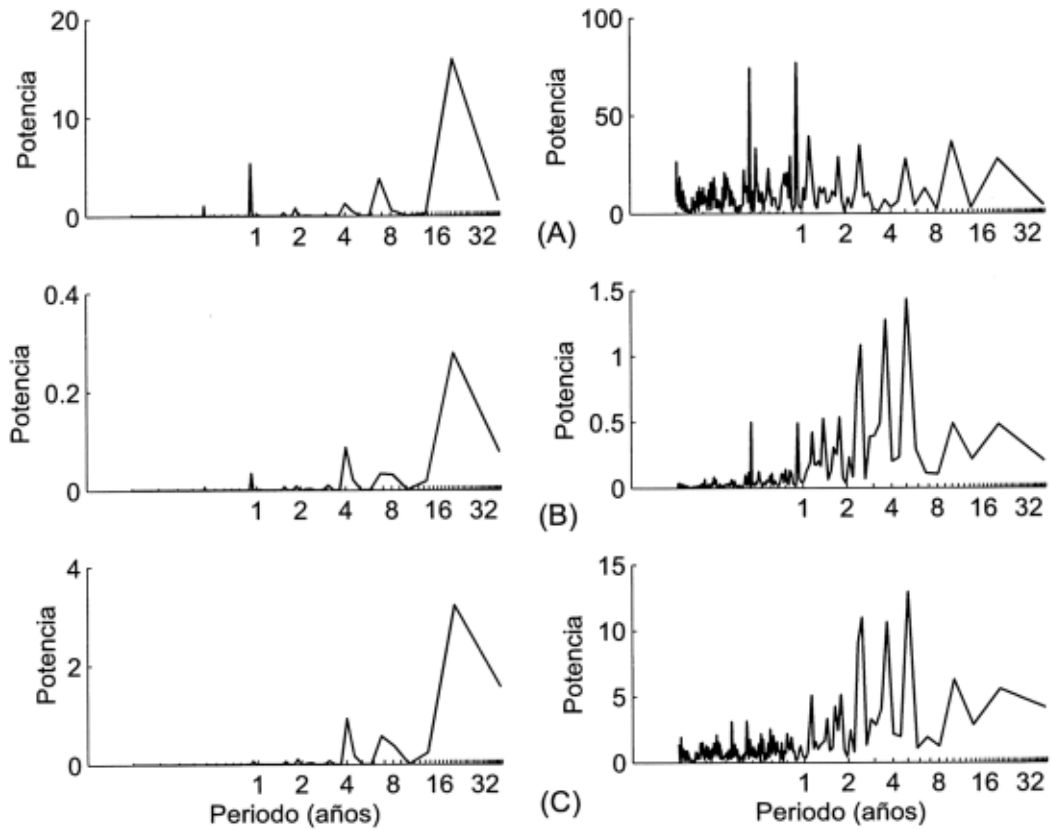


FIGURA 3. ESPECTROS DE POTENCIA MEDIANTE FFT PARA LAS DESCOMPOSICIONES a8 (LADO IZQUIERDO) Y d8 (LADO DERECHO) DE (A) PRECIPITACIÓN MENSUAL (B) TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR EN LA REGIÓN NIÑO 3.4 (C) ÍNDICE DE OSCILACIÓN DEL SUR.

Power spectra by FFT for decomposition a8 (left side) and d8 (right side) (A) (a) monthly precipitation (B) Sea Surface Temperature at El Niño3.4 (C) Southern Oscillation Index.

resultados concuerdan con la comparación de las series d8 para ambas variables (Fig. 2A y Fig. 2B). En este caso, el conocimiento a priori de los procesos permite inferir una asociación.

Para analizar la asociación entre estas variaciones interanuales de la precipitación, se aplicó el análisis de coherencia según la metodología expuesta en Maraun & Kurths

(2004) y Maraun et al. (2007) con el objeto de eliminar posibles zonas de alta correlación relacionadas con co-oscilaciones. La Fig. 5 muestra que existe una asociación entre los años de alta correlación entre las series de temperatura superficial del mar y precipitación y los años de ocurrencia de los fenómenos de El Niño.

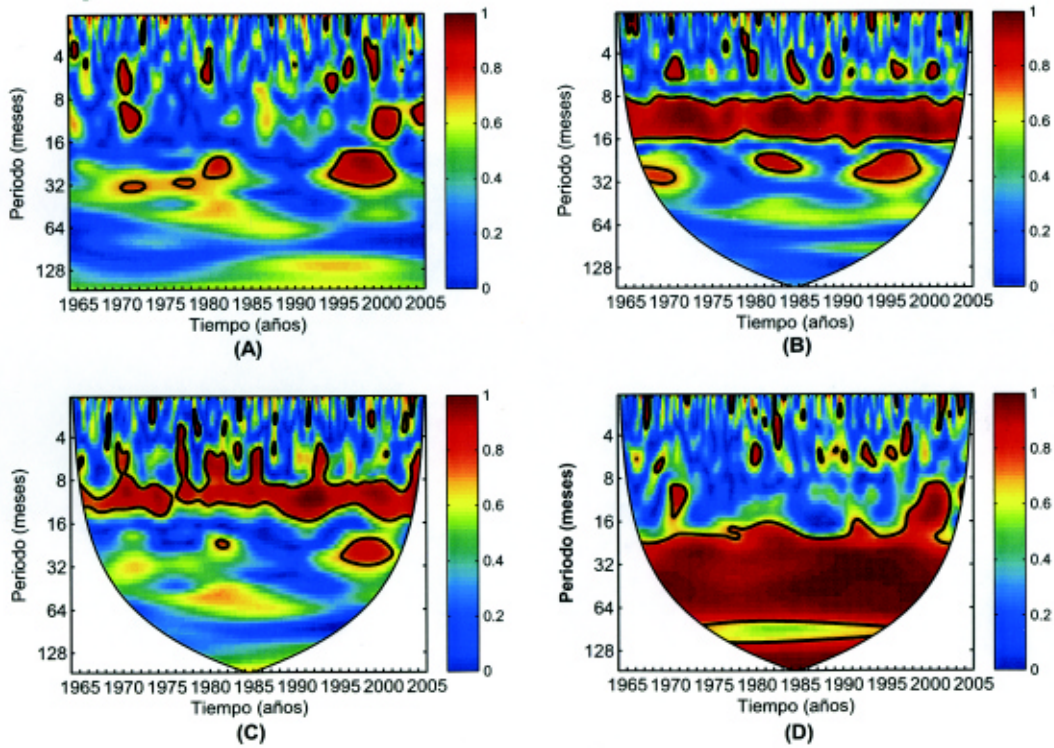


FIGURA 4. COHERENCIA ENTRE (A) SERIES PP Y SOI (B) SERIES PP Y SST1 (C) SERIES PP Y SST34 (D) SERIE SOI Y SST34. LAS LÍNEAS NEGRAS CORRESPONDEN A UN NIVEL DE SIGNIFICANCIA DEL 95 % MEDIANTE SIMULACIÓN DE MONTE CARLO Y ESPECTRO DE RUIDO ROJO. LA ZONA MÁS OSCURAS CORRESPONDEN AL CONO DE INFLUENCIA IE LA ZONA DONDE LOS EFECTOS DE BORDE DE LA SERIE NO AFECTAN LOS VALORES DE COHERENCIA (TORRENCE Y WEBSTER 1999).

Coherency between time series (A) precipitation and SOI (B) precipitation and SST1 (C) precipitation and SST34 (D) SOI and SST34. the thick black contour is the 5% significance level from a Monte Carlo simulation against red noise and the cone of influence where edge effects might distort the picture is shown as a lighter shade.

DISCUSIÓN

Dado que la temperatura superficial del mar es un fenómeno fuertemente estacional, las tendencias no se observan en las series suavizadas sino en las series de alta frecuencia. Puede entonces considerarse que la series a8 son la condición promedio y que variaciones respecto a esta condición, i.e. las series d8, se

asocian con la aparición de eventos como el ENSO. De las Fig. 2 y 3, puede establecerse una asociación anual entre la precipitación, la temperatura del mar, pero no son claras las asociaciones a escala de 4 años. Lo mismo ocurre con la serie SOI dada la alta correlación entre este índice, el fenómeno ENSO y la SST (Fig. 4D). En la Fig. 4B es notable que se observe una alta correlación entre la SST y la precipi-

tación anual, pero que se observe una baja influencia a escalas mensual o quincenal. Lo anterior se explica en el hecho que la SST representa la temperatura en una gran y alejada extensión del Océano Pacífico; sin embargo, escala regional y subcontinental las precipitaciones están asociadas a cambios en SST cercanos a la costa (Fig. 4C).

Aún cuando la correlación entre las series PP y SST es alta en la banda anual, no se observan variaciones regulares en esta correlación.

Por lo anterior, los valores de temperatura superficial del mar en esta zona no permiten utilizar esta alta correlación con fines de pronóstico. En cambio, la temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4, además del hecho que la banda de alta coherencia es más estrecha, se observan, aunque leves, variaciones en la coherencia. Además, se observan regularmente altas correlaciones en la banda de tres a seis meses a intervalos regulares.

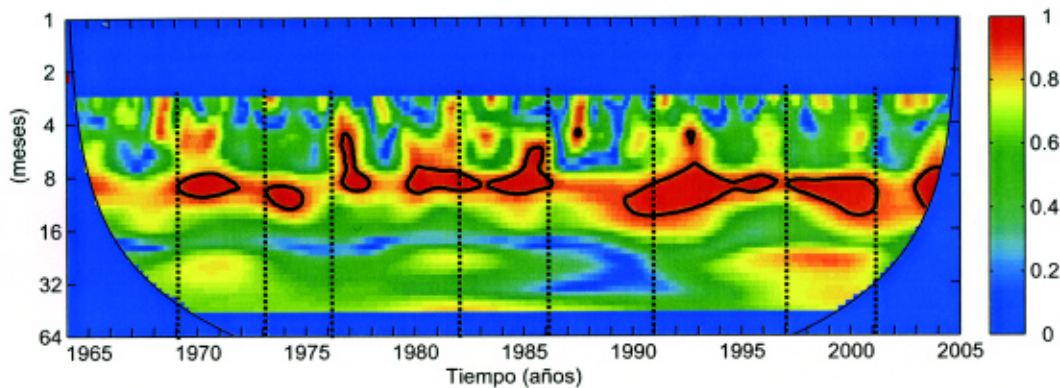


FIGURA 5. COHERENCIA ENTRE LAS SERIES PP Y SST34 APLICANDO EL ALGORITMO DE Maraun et al. (2007). LAS LÍNEAS PUNTEADAS INDICAN EL AÑO DE INICIO DE UN EVENTO EL NIÑO.

Coherency between time series of precipitation and SST34 using the algorithm from Maraun et al. (2007). Dotted lines indicate the beginning of El Niño event.

Debido a la intrínseca temporalidad de las series analizadas, es necesario revisar los métodos de calibración de los modelos hidrológicos predictivos mediante funciones objetivo que minimizan el error promedio sobre la longitud de la serie sin considerar la variabilidad interanual de los fenómenos hidroclimáticos. En efecto, un modelo que incluya la temporalidad de la serie de tiempo mediante algún parámetro que pueda pronosticarse será mejor que los modelos para condiciones promedio (ver Paz et al. 2007).

CONCLUSIÓN

Existe una correlación entre los valores de precipitación mensual y Temperatura Superficial del mar a escalas de entre 8 y 18 meses. La correlación entre estas series es mayor cuando la temperatura superficial del mar genera eventos ENSO, con lo cual se observa cierta regularidad en la variabilidad del régimen de precipitaciones.

Dado que es posible pronosticar la temperatura superficial del mar, este valor puede ser

utilizado como un indicador de la ocurrencia de años lluviosos (tendencia sobre el promedio) y secos (tendencia bajo el promedio), lo que permitiría mejorar el manejo y gestión de los recursos naturales, especialmente los asociados a la actividad agrícola

En todos los casos, la aplicación de la Transformada Wavelet, estimación de los espectros frecuencia y aplicación del concepto de coherencia entre series de tiempo aparecen como herramientas de análisis de tendencias de alta aplicabilidad para datos hidrológicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar sus agradecimientos al proyecto FONDEF D02 I 1146, Proyecto DIUC 207.133.010-1.0 y proyecto FONDECYT 11060056.

Las series de datos y códigos implementados en MATLAB pueden ser solicitados al correo electrónico de los autores. Para el análisis de las series de datos de utilizaron los siguientes software gratuitos implementados en MATLAB:

Software for wavelet spectral analysis and synthesis del Dr. Douglas Maraun.

(<http://tocsy.agnld.uni-potsdam.de/wavelets/>)
Cross Wavelet and Wavelet Coherence de Aslak Grinsted.

(<http://www.pol.ac.uk/home/research/waveletcoherence/>)

A Practical Guide to Wavelet Analysis de los Dres. Christopher Torrence y Gilbert Compo.

(<http://atoc.colorado.edu/research/wavelets/>)

LITERATURA CITADA

- ALDRIAN E & Y S DJAMIL (2008) Spatio-temporal climatic change of rainfall in East Java Indonesia. *International Journal of Climatology* 28: 435-448.
- ANDREO B, JIMÉNEZ P, DURÁN J, CARRASCO F, VADILLO I & A MANGIN (2006) Climatic and hydrological variations during the last 117-166 years in the south of the Iberian Peninsula from spectral and correlation analyses and continuous wavelet analyses. *Journal of Hydrology* 324: 24-39.
- ARUMÍ J L, RIVERA D, HOLZAPFEL E, & A FERNALD (2008) Surface water interactions with shallow groundwater in a hydrologically wellbounded valley in central Chile. En Abesser C (eds) *Groundwater-Surface Water Interaction: Process Understanding, Conceptualization and Modelling*. Number 321 in IAHS Publication series (Red Books). International Association of Hydrological Sciences.
- BARNSTON A, GLANTZ M & Y HE (1999) Predictive skill of statistical and dynamical climate models in SST forecasts during the 1997-98 El Niño episode and the 1998 La Niña onset *The Bulletin of the American Meteorological Society* 80: 217-243.
- CABRERA V, LETSON D & G PODESTÁ (2007) The value of climate information when farm programs matter. *Agricultural Systems* 93: 25-42.
- CHIEW F, PIECHOTA T, DRACUP J & T MCMAHON (1998) El Niño/Southern Oscillation and Australian rainfall stream-ow and drought: Links and potential for forecasting. *Journal of Hydrology* 204:138-149.
- COULIBALY P (2006) Spatial and temporal variability of canadian seasonal precipitation (1900-2000). *Advances in Water Resources* 29: 1846-1865.
- DE LA CASA A & G OVANDO (2006) Influencia de episodios El Niño-Oscilación Sur (ENOS) sobre la precipitación y el rendimiento de maíz en la provincia de Córdoba Argentina. *Agricultura Técnica* 66: 80-89.
- DUTTA S, RITCHIE J, FREEBAIRN D & G ABAWI (2006) Rainfall and streamflow response to El Niño Southern Oscillation: A case study in a semiarid catchment Australia. *Hydrological Sciences Journal* 51: 1006-1020.
- FAGEL N, BOËS X. & F LOUTRE (2008) Climate oscillations evidenced by spectral analysis of

- Southern Chilean lacustrine sediments: the assessment of ENSO over the last 600 years. *Journal of Paleolimnology* 39: 253-266.
- FERNÁNDEZ H & B FERNÁNDEZ (2002) Influencia del ENOS en el régimen de precipitaciones en el Cono Sur de América. *Revista Ingeniería Hidráulica en México* 17: 5-16.
- FERREYRA R, PODESTÁ G, MESSINA C, LETSON D, DARDANELLI J, GUEVARA E & S MEIRA (2001) A linked-modeling framework to estimate maize production risk associated with ENSO-related climate variability in Argentina. *Agricultural and Forest Meteorology* 107: 177-192.
- GARCÉS-VARGAS J, SCHNEIDER W, ABARCA DEL RÍO R, MARTÍNEZ R & E ZAMBRANO (2005) Inter-annual variability in the thermal structure of an oceanic time series station in Ecuador (1990-2003) associated with El Niño events. *Deep-Sea Research* 52: 1789-1805.
- GRIMM A, BARROS V & M DOOYLE (2000) Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate* 13: 35-58.
- GRINSTED A, MOORE J & S JEVREJEVA (2004) Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics* 11: 561-566.
- GU D & S PHILANDER (1995) Secular changes of annual and interannual variability in the tropics during the past century. *Journal of Climate* 8: 864-876.
- HAMMER G, HOLZWORTH D & R STONE (1996) The value of skill in seasonal climate forecasting to wheat crop management in a region with high climatic variability. *Australian Journal of Agricultural Research* 47: 717-737.
- HANSON R, DETTINGER M & M NEWHOUSE (2006) Relations between climatic variability and hydrologic time series from four alluvial basins across the southwestern United States. *Hydrogeology Journal* 14: 289-311.
- KANG S & H LIN (2007) Wavelet analysis of hydrological and water quality signals in an agricultural watershed. *Journal of Hydrology* 338: 1-14.
- KUMAR P & E FOUFOULA-GEORGIOU (1997) Wavelet analysis for geophysical applications. *Reviews of Geophysics* 35: 385-412.
- KWON H, KHALIL A & T SIEGFRIED (2008) Analysis of extreme summer rainfall using climate teleconnections and typhoon characteristics in South Korea. *Journal of the American Water Resources Association* 44: 436-448.
- LABAT D (2008) Wavelet analysis of the annual discharge records of the world's largest rivers. *Advances in Water Resources* 31: 109-117.
- LABAT D (2005) Recent advances in wavelet analyses: Part 1 A review of concepts. *Journal of Hydrology* 314: 275-288.
- LABAT D, GODDÉRIS Y, PROBST J & J GUYOT (2004) Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources* 27: 631-642.
- LABAT D, RONCHAIL J & J GUYOT (2005) Recent advances in wavelet analyses: Part 2 Amazon Parana Orinoco and Congo discharges time scale variability. *Journal of Hydrology* 314: 289-311.
- LAU K & H WENG (1995) Climate signal detection using wavelet transform: How to make a time series sing. *The Bulletin of the American Meteorological Society* 76: 2391-2402.
- LI T, LI Q, ZHU S & M OGIHARA (2002) A survey on wavelet applications in data mining. *SIGKDD Explorations* 4: 49-68.
- LUQUE J (2003) El Lago de Sanabria: un sensor de las oscilaciones climáticas del Atlántico Norte durante los últimos 6000 años. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona Departamento de Geoquímica Petrología y Prospección Geológica España.
- MALLAT S (1999) *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press.
- MALLAT S, JAGGI S, KARL W & A WILLSKY (1998) High resolution pursuit for feature extraction. *Applied and Computational Harmonic Analysis* 5: 428-449.
- MARAUND & J KURTHS (2004) Cross wavelet analysis: significance testing and pitfalls. *Nonlinear Processes in Geophysics* 11: 505-514.

- MARAUND, KURTHS J & MHOLSCHNEIDER (2007) Nonstationary gaussian processes in wavelet domain: Synthesis estimation and significance testing. *Physical Review E* 75: 016707.
- MARKOVIC D & M KOCH (2005) Wavelet and scaling analysis of monthly precipitation extremes in germany in the 20th century: Interannual to interdecadal oscillations and the North Atlantic Oscillation influence. *Water Resources Research* 41: W09420.
- MASSEI N, DURAND A, DELOFFRE J, DUPONT J P, VALDES D & B LAIGNEL (2007) Investigating possible links between the North Atlantic Oscillation and rainfall variability in northwestern France over the past 35 years. *Journal of Geophysical Reserach* 112 D09121 doi:10.1029/2005JD007000.
- MEZA F (2005) Variability of reference evapotranspiration and water demands association to ENSO in the Maipo river basin Chile. *Global and Planetary Change* 47: 212-220.
- MEZA F & D WILKS (2004) Use of seasonal forecasts of sea surface temperature anomalies for potato fertilization management theoretical study considering EPIC model results at Valdivia Chile. *Agricultural Systems* 82: 161-180.
- MEZA F, WILKS D, RIHA S & J STEDINGER (2003) Value of perfect forecasts of sea surface temperature anomalies for selected rain-fed agricultural locations of Chile. *Agricultural and Forest Meteorology* 116: 117-135.
- MONTECINOS A & P ACEITUNO (2000) Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. *Journal of Climate* 16: 281-296.
- MONTECINOS A, DÍAZ A & P ACEITUNO (2000) Seasonal diagnostic and predictability of rainfall in subtropical south america based on tropical pacific SST. *Jornal of Climate* 13: 746-758.
- NTALE H & T GAN (2004) East African rainfall anomaly patterns in association with El Niño/Southern Oscillation. *Journal of Hydrologic Engineering* 9:257-268.
- PAZ J, FRAISSE C, HATCH L, GARCIA Y GARCIA A, GUERRA L, URYASEV O, BELLOW J, JONES J & G HOOGENBOOM (2007) Development of an ENSO-based irrigation decision support tool for peanut production in the southeastern US *Computers and Electronics in Agriculture* 55: 28-35.
- PERCIVAL D & A WALDEN (2000) *Wavelets Methods for Time Series Analysis*. Cambridge University Press.
- PEZZULLI S, STEPHENSON D & A HANNACHI (2005) The variability of seasonality. *Journal of Climate* 18: 71-88.
- QUINTANA J (2004) Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en chile en escalas de tiempo interdecadal. Tesis de Magíster, Universidad de Chile Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Chile.
- ROPELEWSKI C & M HALPERT (1986) North american precipitation and temperature patterns associated with el niño/southern oscillation. *Monthly Weather Review* 114: 2352-2362.
- ROPELEWSKI C & M HALPERT (1987) Global and regional scale precipitation patterns associaed with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 115: 1606-1626.
- RUIZ J, CORDERY I & A SHARMA (2007) Forecasting streamflows in australia using the tropical indo-pacific thermocline as predictor. *Journal of Hydrology* 341: 156-164.
- SCHAEFLI B, MARAUN D & M HOLSCHNEIDER (2007) What drives highflow events in the Swiss Alps? Recent developments in wavelet spectral analysis and their application to hydrology. *Advances in Water Resources* in press.
- STONE R, HAMMER G & T MARCUSSEN (1996a) Prediction of global rainfall probabilities using phases of the Southern Oscillation Index. *Nature* 386: 252-255.
- STONE R, NICHOLLS N & G HAMMER (1996b) Frost in northeast australia: Trend and influences of phases of the southern oscillation. *Journal of Climate* 9: 1896-1909.
- TORRENCE C & G COMPO (1998) A practical guide to wavelet analysis. *The Bulletin of the American Meteorological Society* 79: 61-78.

|||

- TORRENCE C & P WEBSTER (1999) Interdecadal changes in the ENSO-Monsoon system. *Journal of Climate* 12: 2679-290.
- TRENBERTH K (1997) The definition of El Niño. *The Bulletin of the American Meteorological Society* 78: 2771-2777.
- WANG B & Y WANG (1996) Temporal structure of the Southern Oscillation as revealed by waveform and wavelet analysis. *Journal of Climate* 9: 1586-1598.
- WAYLEN P & G POVEDA (2002) El Niño-Southern Oscillation and aspects of western south american hydro-climatology. *Hydrological Processes* 16: 1247-1260.
- ZHANG Q, XU C, TONG J & Y WU (2007) Possible influence of ENSO on annual maximum streamflow of the Yangtze River China. *Journal of Hydrology* 333: 265-274.

Recibido: 02.07.2007, aceptado: 30.11.2007