



Bosque

ISSN: 0304-8799

revistabosque@uach.cl

Universidad Austral de Chile

Chile

González-Reyes, Álvaro; Muñoz, Ariel A  
Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años  
Bosque, vol. 34, núm. 2, 2013, pp. 191-200  
Universidad Austral de Chile  
Valdivia, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173128718008>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Cambios en la precipitación de la ciudad de Valdivia (Chile) durante los últimos 150 años

Precipitation changes of Valdivia city (Chile) during the past 150 years

Álvaro González-Reyes <sup>a,b\*</sup>, Ariel A Muñoz <sup>b,c,d</sup>

\*Autor de correspondencia: <sup>a</sup> Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas,

Departamento de Geología, Santiago, Chile, alvarogonzalezreyes@u.uchile.cl

<sup>b</sup> Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Instituto de Conservación

Biodiversidad y Territorio, Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global, Valdivia, Chile.

<sup>c</sup> Universidad Técnica Federico Santa María, Centro de Tecnologías Ambientales CETAM, Valparaíso, Chile.

<sup>d</sup> Universidad Austral de Chile, Centro de Estudios Ambientales CEAM, Valdivia, Chile.

### SUMMARY

Extensive records of rainfall are considered fundamental for analysing potential current climate change especially in zones where ecosystems are highly humidity dependent. Valdivia city has the longest instrumental record in the nation, starting in 1853, though including a lapse between 1880 and 1899. The present study had the main objective of evaluating changes in precipitation in annual, seasonal and monthly periods and distribution extreme values from 1901 to 2005; further, the activity of global scale climate forcing, such as ENSO and AAO, over the precipitation. Additionally, we have filled this gap period with other instrumental historical registers and *Araucaria araucana* Tree Ring chronology by evaluated rainfall shifts since 1853. Annual, seasonal and monthly decreases were registered between 1901 and 2005. Especially significant for 1853 - 2005, 1901 - 2005, autumn and September. Negative extreme values (droughts) were more frequent in the second half-century, compared with positive extreme values obtained prior to 1950. A high concentration of negative values was also registered post-1980, especially in autumn and winter. Significant and negative correlations were registered between the SOI indexes of ENSO, with a strong relationship across the year, except in summer. The AAO has registered negative and significant relationships as well, particularly during autumn, and February and March. These decreases suggest an extension of summer-time conditions in Valdivia for longer intervals, concentrating precipitation in winter.

**Key words:** Valdivian ecoregion, extreme values, autumn precipitation, El Niño Southern Oscillation ENSO, Antarctic Oscillation AAO.

### RESUMEN

Registros extensos de precipitación son fundamentales para analizar potenciales cambios en el clima, especialmente en zonas que albergan ecosistemas pluvio-dependientes. La ciudad de Valdivia posee el registro más extenso de Chile, comenzando en 1853, pero encontrándose incompleto entre 1880-1899. El presente estudio tuvo por objetivo central evaluar los cambios en la precipitación anual, estacional y mensual de Valdivia, y la distribución de valores extremos entre 1901 - 2005. Además, fue evaluado el efecto de forzantes climáticos de gran escala (ENSO, AAO), sobre los patrones de precipitación. En adición, para evaluar cambios en la precipitación desde 1853, fue completado el periodo sin información con otros registros instrumentales históricos y ancho de anillos de *Araucaria araucana* para evaluar los cambios desde 1853. Fueron registrados decrecimientos anual, estacional y mensual 1901 - 2005, siendo significativos para los períodos: anual (1853 - 2005, 1901 - 2005), otoño y septiembre. Los valores extremos de baja precipitación (sequías) fueron más frecuentes post-1950, en comparación con valores extremos de alta pluviosidad, registrados mayormente en la primera mitad siglo XX. La mayor concentración de registros de sequía se produjo post-1980, especialmente en otoño e invierno. Correlaciones negativas y significativas fueron obtenidas con el índice SOI de ENSO, registrando una fuerte relación a través del año, excepto en verano. La actividad del AAO ha registrado una relación significativa con la precipitación de otoño, y con los meses de febrero y marzo. Los resultados sugieren que la reducción de precipitación se manifiesta en una extensión de las condiciones estivales hacia parte del otoño, concentrando la precipitación en invierno.

**Palabras clave:** ecorregión valdiviana, eventos extremos, precipitación de otoño, El Niño Oscilación del Sur ENSO, Oscilación Antártica AAO.

### INTRODUCCIÓN

Extensos y continuos registros de precipitación instrumental son escasos en Chile. Este tipo de registros son de gran utilidad para conocer la variabilidad del clima pasado, evaluar los actuales cambios en el clima y pronosticar

efectos sobre los sistemas agro-forestales, especialmente los relacionados con la disponibilidad futura de agua. Excepcionalmente en algunas ciudades de Chile (e.g. Concepción, Valdivia, Punta Arenas, Santiago, Puerto Montt), la medición de las precipitaciones comenzó en el siglo XIX. En la ciudad de Valdivia, los primeros registros

instrumentales se iniciaron en 1853 gracias al trabajo de Carlos Anwandter, colono alemán impulsor de la actividad industrial en la zona.

La precipitación en la zona centro - sur de Chile esta relacionada con los sistemas frontales provenientes del Océano Pacífico, los que a su vez son regulados por la dinámica anual del Anticiclón del Pacífico y la variabilidad interanual asociada a El Niño Oscilación del Sur (ENSO) (Aceituno 1988). Si bien la fase cálida de ENSO en la zona central de Chile ( $30^{\circ}$  -  $35^{\circ}$  S) se asocia con un aumento de las precipitaciones medias invernales, en el sur ( $38^{\circ}$  -  $41^{\circ}$  S) los eventos El Niño suelen vincularse con una reducción de precipitaciones, especialmente en el verano siguiente. Condiciones inversas son registradas sobre estas regiones bajo la fase fría de ENSO, La Niña (Montecinos y Aceituno 2003). Por su parte, en la zona sur - austral de Chile y del hemisferio sur, la variabilidad de las precipitaciones estaría relacionada mayormente con diferencias en la presión atmosférica entre latitudes medias y altas, forzante conocido como Oscilación Antártica (AAO) o Modo Anular del Sur (SAM; Thompson y Wallace 2000). Este forzante ha presentado una variación considerable en una escala temporal intermensual a interanual, con una marcada tendencia positiva en los últimos 50 años (Garreaud *et al.* 2009). La zona de Valdivia se encuentra dentro de un área transicional de la influencia de ambos forzantes climáticos anteriormente descritos (ENSO y AAO). Por otro lado, la zona está considerada como un sitio de alta biodiversidad e importancia para la conservación biológica, denominada “ecorregión valdiviana”. Esta es la principal área de bosques templados en Sudamérica, la cual ha sido reconocida como uno de los ecosistemas mayormente amenazados en el mundo por la Iniciativa Global 200 (Olson y Dinerstein 2002), debido a la alta cantidad de endemismos de esta región y las fuertes amenazas por actividades antrópicas y cambio climático (Myers *et al.* 2000). Muchos de los bosques de esta zona son altamente dependientes de condiciones húmedas, albergando algunos de los ecosistemas boscosos templados más prístinos y en donde las precipitaciones son consideradas de alta pureza a escala global. Además, la zona cuenta con importantes reservorios de agua dulce (ríos, lagos, glaciares, humedales, entre otros), los cuales son utilizados para la generación de energía eléctrica, el riego para la agricultura y el consumo humano, entre otras actividades.

Los registros de precipitación de Valdivia se encuentran entre los más antiguos de Chile y América del Sur, y han sido útiles para identificar uno de los episodios de mayor actividad ENSO entre los años 1877 - 1878, fenómeno que tuvo como consecuencia grandes sequías, enfermedades e inundaciones en distintas regiones del mundo (Aceituno *et al.* 2008). Si bien, aun es escasa la información acerca de los efectos del AAO en el clima de Chile, estudios recientes sugieren a este forzante como el principal modulador de las precipitaciones en la zona sur y austral de Chile (Aravena y Luckman 2009).

El uso de anillos de crecimiento de árboles (dendrocronología) para evaluar cambios en las condiciones climáticas pasadas (dendroclimatología) ha sido una técnica fuertemente utilizada en la zona centro, sur y austral de Chile hace décadas. Algunos estudios aplicando esta técnica han permitido reconstruir los cambios en los regímenes de precipitación de Chile central para los últimos 800 años (Le Quesne *et al.* 2006), regímenes de precipitación para la porción norte de Patagonia en los últimos 400 años (Villalba *et al.* 1998), y recientemente de la Oscilación Antártica, empleándose muestras de más 3.000 árboles de varias especies del hemisferio sur, entre ellas la conífera *Araucaria araucana* (Mol.C.Koch) (Villalba *et al.* 2012).

Considerando la escasez de registros climáticos de larga data y la necesidad de evaluar la variabilidad climática reciente en forma exhaustiva dentro de Chile, especialmente en una zona ecológica fuertemente dependiente de las precipitaciones, el objetivo principal de este trabajo ha sido evaluar la variabilidad temporal de la precipitación en la ciudad de Valdivia y sus relaciones con forzantes de gran escala. Como objetivos específicos se han planteado: i) evaluar las tendencias mensuales, estacionales y anuales de la precipitación, ii) evaluar la distribución temporal de valores extremos en cada estación del año, iii) evaluar la influencia de los forzantes climáticos de gran escala (ENSO y AAO) sobre la precipitación, y iv) emplear el uso de anillos de crecimiento de *A. araucana* para validar la información registrada por Anwandter entre 1853 - 1879, y el uso de otros registros de precipitación pre 1900, para completar el vacío de información de la estación de Valdivia existente entre 1880 - 1899.

## MÉTODOS

**Área de estudio.** La ciudad de Valdivia, ubicada entre los  $39^{\circ} 48' S$  y  $73^{\circ} 14' O$ , presenta un clima del tipo templado lluvioso, caracterizado por una alta pluviosidad concentrada en la estación invernal, escasez de meses secos y bajas temperaturas en invierno. Entre los meses de mayo y agosto se registra más del 50 % de la precipitación total anual. Según Luebert y Pliscott (2006) la ciudad de Valdivia se encuentra dentro de un macrobioclima templado, con una influencia específica de un bioclima templado hiperoceánico, con baja oscilación térmica.

**Datos climatológicos utilizados.** Se utilizó el registro instrumental histórico de precipitación de la ciudad de Valdivia, recopilado por el Instituto de Geociencias de la Universidad Austral de Chile (estación Isla Teja), con datos continuos entre 1853 - 1879, y entre 1901 - 2005. Cabe mencionar que el registro de precipitación se ha establecido en tres lugares diferentes dentro de la ciudad de Valdivia. Sin embargo, la distancia entre la ubicación actual de la estación (Universidad Austral de Chile, campus Isla Teja) y las anteriores (Casa Anwandter; actual museo histórico y antropológico Mauricio Van de Maele y Municipalidad de Valdivia), no supera 1 km de distancia entre ellas.

Se construyeron series de precipitación acumulada (sumatoria de meses) para el periodo anual (enero - diciembre) y estacional. La precipitación de verano fue considerada como la precipitación acumulada entre los meses de diciembre a febrero [DEF], otoño entre marzo-mayo [MAM], invierno entre junio-agosto [JJA] y primavera entre septiembre-noviembre [SON]. No obstante, también se utilizó el registro mensual para evaluar tendencias y corroborar los resultados estacionales.

El registro anual de precipitación de Valdivia también fue comparado con los registros de precipitación instrumental histórica de las ciudades de Puerto Montt y Concepción, los cuales fueron obtenidos desde la Dirección Meteorológica de Chile (DMC). La comparación con estos registros se ha hecho a fin de contrastar la variabilidad temporal en las precipitaciones, especialmente para el periodo de Anwandter y a principios del siglo XX.

*Validación del registro de precipitación de Valdivia previo al año 1900 utilizando anillos de crecimiento de árboles y registros de precipitación histórica.* De un total de siete cronologías de ancho de anillos de *Araucaria araucana* desarrolladas por el Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Universidad Austral de Chile, ubicadas en la vertiente oriental de Los Andes - área chilena de la distribución de la especie, se seleccionó la mejor correlacionada con el registro anual de precipitación de Valdivia en el periodo 1853 - 1879. Las cronologías fueron confeccionadas utilizando procedimientos comunes en dendrocronología, donde las series de crecimiento fueron fechadas asignando un año calendario a cada anillo de crecimiento, y posteriormente corroborado utilizando el programa COFECHA (Holmes 1983). Para eliminar el efecto de la edad y de la historia del rodal, las series de crecimiento fueron estandarizadas utilizando una función exponencial negativa. La cronología seleccionada está constituida por 90 árboles de *A. araucana* provenientes de bosques aledaños al volcán Lanín (Reserva Nacional Villarrica: 39° 35' S, 71° 31' O), cerca del límite con Argentina. Dicha información aportada por *A. araucana* ha sido promediada (en años donde ha existido registro) con la precipitación anual de Concepción y Puerto Montt utilizando las series en desvíos estandarizados o valores Z.

*Evaluación de tendencias y distribución de los valores extremos.* Para evaluar las tendencias en las series de precipitación anuales, mensuales y estacionales, se usaron regresiones lineales simples y la prueba de Mann-Kendall. Esta última prueba no paramétrica, permite comparar y ordenar las tendencias de una serie temporal valor por valor, evaluando su monotonía. Estos análisis se desarrollaron para el periodo entre 1901-2005, en el cual existe mayor certeza e información acerca de la calidad de los datos.

Para definir los valores extremos en las series de precipitaciones anual y estacional, se utilizó un umbral establecido por  $\pm 1$  y  $\pm 2$  desviaciones estándar. Los valores extre-

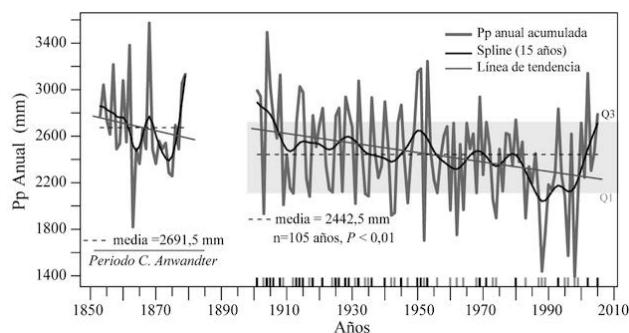
mos fueron analizados dividiendo las series de precipitación en cinco intervalos regulares de 21 años entre 1901 y 2005. Posteriormente, fueron contabilizados en cada una de las series para analizar su distribución temporal entre intervalos.

*Relación con forzantes de gran escala (El Niño Oscilación del Sur, Oscilación Antártica).* Para evaluar la relación entre la precipitación y ENSO, se utilizó el índice de Oscilación del Sur (SOI). Este índice registra las diferencias de presión atmosférica entre Tahití y Darwin, siendo un excelente indicador de las variaciones en los campos de presión en el Pacífico tropical. El SOI adquiere valores negativos cuando hay presencia de la fase "El Niño", y valores positivos bajo una fase "La Niña". Para igual periodo de tiempo se utilizó el Índice de Oscilación Antártica (AAO-NCEP) estandarizado y sin tendencia. Este índice registra las diferencias de presiones atmosféricas entre latitudes medias (cerca de los 45° S) y altas latitudes (cerca de los 60° S en dirección hacia el polo Sur). La relación entre la precipitación y los dos índices que representan la actividad de los forzantes de origen tropical y antártico, fue analizada mes a mes y en cada una de las estaciones del año, extrayendo igual combinación de meses (e.g. precipitación de otoño fue relacionada con el promedio de igual meses del SOI y AAO). Se utilizó el periodo común entre los dos índices (1948 - 2005) para el análisis comparativo de su influencia sobre la precipitación. Ambos índices climáticos fueron obtenidos del sitio Web de la Administración Nacional del Océano y la Atmosfera de Estados Unidos (NOAA 2011).

## RESULTADOS

Una reducción significativa de la precipitación anual ha sido registrada entre 1901-2005 (Mann-Kendall,  $P < 0,01$ ), con una mayor frecuencia de años bajo la media y bajo el percentil 25 (Q1) posterior a 1950 (figura 1). Las primeras mediciones realizadas por Anwandter registraron un promedio anual de 2.691,5 mm en el periodo 1853-1879, montos de precipitaciones que se reducen a 2.442,5 mm entre los años 1901-2005. Algunos de los registros entre 1853 - 1879 muestran montos de precipitación anual acumulada sobre los 3.000 mm (e.g. año 1854, 1857, 1860). En el periodo instrumental post 1901, a nivel estacional se registraron reducciones en todas las estaciones del año, siendo más marcadas en otoño e invierno, sin embargo sólo en otoño esta tendencia alcanzó niveles significativos (Mann-Kendall  $P < 0,01$ ,  $P < 0,05$ ). A nivel mensual, a excepción de octubre, se registró una disminución en todos los meses. Reducciones mensuales significativas en la precipitación fueron obtenidas en los meses de abril y septiembre (Mann-Kendall  $P < 0,01$ ,  $P < 0,05$ ).

*Validación del registro Anwandter y reducción anual y estacional de precipitaciones.* El registro de precipitación de Valdivia presentó altas correlaciones con otros registros extensos del centro-sur de Chile, como Puerto Montt



**Figura 1.** Serie temporal de precipitación anual acumulada en el periodo Anwandter (1853 - 1879), y del registro continuo de la estación de Valdivia (1901-2005). El promedio anual de cada periodo ha sido representado por líneas discontinuas. La franja gris representa el rango intercuartil (Q3 - Q1), donde años sobre el percentil 75 (Q3) o bajo el percentil 25 (Q1) han sido representados por barras verticales sobre la línea de tiempo en el periodo continuo de registros de la estación de Valdivia. Las barras de colores negro y gris, representan años húmedos y secos, respectivamente. El decrecimiento de las precipitaciones ha sido significativo entre 1901 - 2005 ( $P < 0,01$ ). Se ha aplicado un ajuste cúbico (Spline) de 15 años para resaltar la baja frecuencia contenida en la serie de precipitación.

Annual cumulative precipitation time series of Anwandter period (1853 - 1879), and continuous register (1901 - 2005). Annual mean per each period has been represented with dashed lines. The grey band shows the interquartile range (Q3 - Q1), where years over 75 percentile (Q3) or under 25 percentile (Q1) have been identified with vertical bars above the time line. Both lines represent dry and wet years, respectively. Precipitation decrease was significant in the period 1901 - 2005 ( $P < 0,01$ ). To show the low frequency of precipitation series, a spline filter using 15 years was applied.

( $r = 0,71, P < 0,001$ ) y Concepción ( $r = 0,63, P < 0,001$ ), utilizando un periodo común de 93 años (1909 - 2001; figura 2A). Estas estaciones comenzaron sus registros en 1860 y 1876, respectivamente, por lo cual el periodo común de estas estaciones con la precipitación de Valdivia previo a 1900 no fue suficientemente extenso y continuo para evaluar la calidad de los datos registrados por Anwandter entre 1853 - 1879. Sin embargo, el crecimiento de *A. araucana* presentó correlaciones bajas pero significativas ( $r = 0,44, P < 0,05$ ) con la precipitación de Valdivia durante el periodo 1853 - 1879 (27 años, figura 2B), similares a aquellas que presentó en el periodo 1950 - 2000 ( $r = 0,43, P < 0,05$ ).

Tras completar el registro entre los años 1880 - 1899 combinando la información instrumental y la cronología de ancho de anillos de *A. araucana*, se analizó la tendencia del nuevo registro anual, ahora continuo desde 1853 hasta el año 2005 (figura 3), obteniéndose una reducción significativa de la precipitación ( $P < 0,001$ ) utilizando la prueba de Mann-Kendall, al igual que para la serie continua post-1901. Si se considera que las mediciones desarrolladas por C. Anwandter poseen montos correctos de precipitación, podemos decir que los primeros 27 años del siglo XX (1901-1928) llovía 314 mm más que en los 27 últimos años

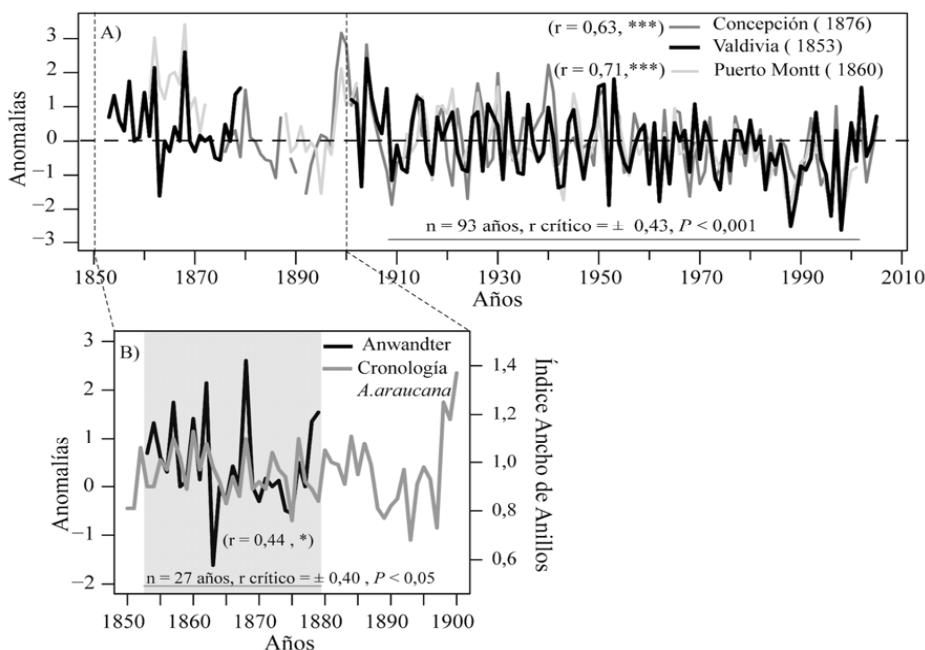
considerados en este trabajo (1978-2005), pero que esta diferencia es aun mayor si consideramos el periodo 1853-1879, donde llovía 392 mm más que en los últimos 27 años.

**Cambios temporales en la frecuencia de valores extremos de precipitación.** Durante el periodo 1901-2005, los valores extremos del periodo anual - definidos por superar (positiva o negativamente) el umbral de una o dos desviaciones estándar - concentraron eventos de alta pluviosidad en la primera mitad del siglo XX (periodos: 1901 - 1921, 1922 - 1942 y 1943 - 1963), a diferencia de años de baja pluviosidad, que fueron más frecuentes durante la segunda mitad del siglo (periodos: 1964 - 1984, y 1985 - 2005) (figura 4). Los primeros 21 años del siglo XX (1901-1921) presentaron el mayor número de años (siete) de alta pluviosidad. En tanto, la mayor frecuencia de años de baja pluviosidad, cinco y cuatro valores, fueron registrados en los intervalos 1943 - 1963 y 1985 - 2005, respectivamente. Una distribución similar de los valores extremos fue registrada en todas las estaciones del año, con alta frecuencia de bajas precipitaciones en los últimos tres intervalos (desde 1943 al 2005), a diferencia de registros de alta pluviosidad ubicados entre 1901 - 1921, especialmente en otoño e invierno (figura 4). El mayor número de valores extremos negativos a nivel estacional (seis valores) fue obtenido en otoño e invierno dentro del periodo 1985 - 2005. Contrariamente, la mayor frecuencia de valores positivos fue registrada en otoño entre los años 1901 - 1921. Un aumento en el número de valores negativos se observó especialmente posterior al año 1950, periodo en el cual se registraron ocho de los 10 valores más extremos del siglo XX (cuadro 1).

**Cuadro 1.** Ranking de los 10 valores más extremos (positivos y negativos) registrados en la precipitación anual acumulada entre 1901 - 2005. Todos los valores superaron  $\pm 1$  desviación estándar.

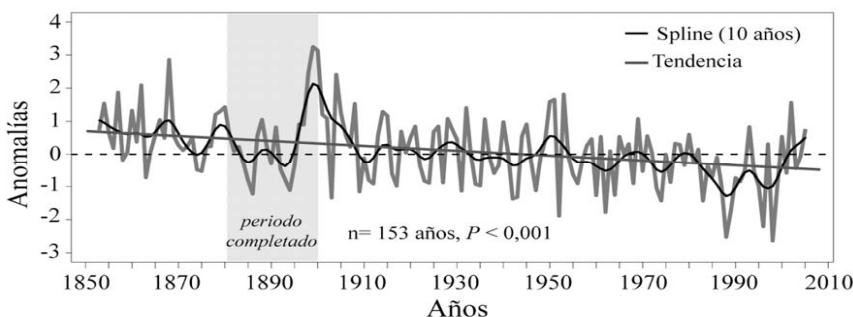
Ranking of higher (positive) and lower (negative) extreme values registered on annual cumulative precipitation. All values shown were higher and lower than  $\pm 1$  standard deviation.

| Años | Valores extremos de baja pluviosidad |      | Valores extremos de alta pluviosidad |      |
|------|--------------------------------------|------|--------------------------------------|------|
|      | Precipitación anual (mm)             | Años | Precipitación anual (mm)             | Años |
| 1998 | 1.393,6                              | 1904 | 3.492,6                              |      |
| 1988 | 1.438,8                              | 1953 | 3.244,1                              |      |
| 1996 | 1.573,4                              | 1951 | 3.179,2                              |      |
| 1952 | 1.705,4                              | 1950 | 3.151,2                              |      |
| 1962 | 1.752,3                              | 2002 | 3.140,2                              |      |
| 1989 | 1.768,9                              | 1908 | 3.126,7                              |      |
| 1983 | 1.896,1                              | 1932 | 3.075,0                              |      |
| 1974 | 1.896,6                              | 1914 | 3.026,0                              |      |
| 1942 | 1.920,0                              | 1905 | 3.014,5                              |      |
| 1903 | 1.933,4                              | 1901 | 2.990,9                              |      |



**Figura 2.** A) Registros históricos de la precipitación anual acumulada de las ciudades de Concepción, Puerto Montt y Valdivia, con el valor de correlación  $r$  de Pearson utilizando el periodo 1901 - 2005. Años entre paréntesis en cada estación indican el año de inicio del registro instrumental. B) Precipitación anual acumulada en el periodo Anwandter (1853 - 1879) junto a una cronología de ancho de anillos de *Araucaria araucana* proveniente del Parque Nacional Villarrica, sector volcán Lanín.

A) Historical records of annual cumulative precipitation of Concepción, Puerto Montt and Valdivia cities, with Pearson correlation values using 1901 - 2005 period. Years in parentheses represent the start year of instrumental registers per each station. B) Annual cumulative precipitation on Anwandter period (1853 - 1879) with an *Araucaria araucana* tree ring chronology from Lanín volcano (Villarrica National Park). The correlation between precipitation register and the chronology was significant ( $P < 0.05$ ).

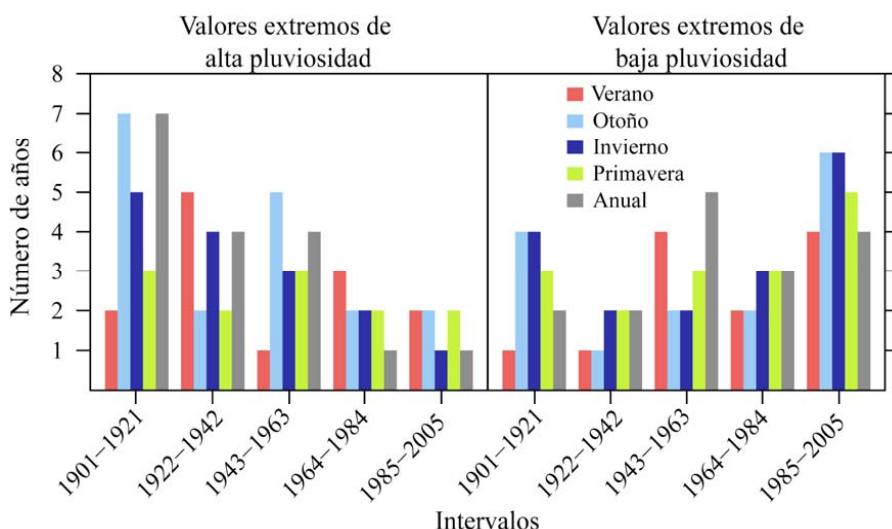


**Figura 3.** Serie temporal anual de precipitación expresada en anomalías entre 1853 - 2005. El periodo entre 1880 - 1900 ha sido completado con la información instrumental histórica de las estaciones Concepción y Puerto Montt, además de la cronología de ancho de anillos de *Araucaria araucana*. Un Spline de 10 años ha sido agregado con el objetivo de resaltar la señal decadal dentro de la serie.

Annual fill precipitation time series expressed in standardized anomalies between 1853 and 2005. The period 1880 - 1899 was filled using other historical instrumental registers from Puerto Montt and Concepción, and *A. araucana* tree ring chronology. To show the decadal signal of precipitation series, a spline filter using 10 years was applied.

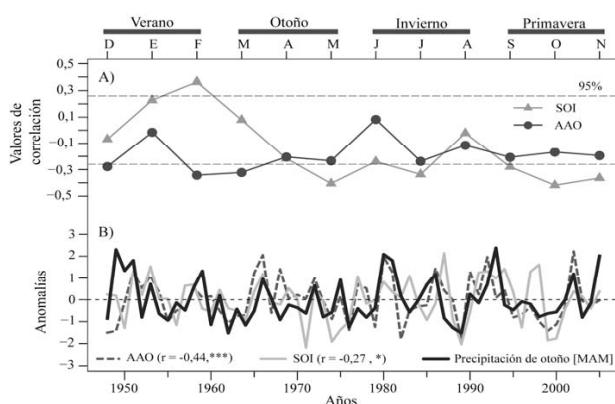
**Influencia de forzantes climáticos de gran escala sobre la variabilidad de precipitaciones.** La precipitación de Valdivia presentó distintas relaciones con los forzantes climáticos ENSO (utilizando el índice SOI) y AAO a nivel mensual y estacional entre 1948 - 2005. A escala mensual, el índice SOI de febrero registró una positiva y significativa relación con la precipitación ( $P < 0,05$ ), contrariamente a los valores de los meses de mayo, julio, octubre y noviem-

bre, los cuales registraron correlaciones negativas y significativas ( $P < 0,05$ ). El índice de Oscilación Antártica, por su parte, registró valores de correlación negativos y significativos ( $P < 0,05$ ) únicamente en los meses de febrero, marzo y diciembre (figura 5A). A nivel estacional la precipitación de otoño, invierno y primavera mostró correlaciones negativas significativas con el SOI en iguales estaciones (cuadro 2), indicando que mayormente son eventos del tipo



**Figura 4.** Suma de valores extremos de alta (meses lluviosos) y baja pluviosidad (meses secos) respecto de la media del periodo completo de la precipitación anual y estacional. Fueron considerados valores extremos aquellos que sobrepasaron una y dos desviaciones estándar. Cada intervalo resume la suma de valores sobre o bajo  $\pm 1$  y  $\pm 2$  desviaciones para el periodo anual y por estaciones. El número de valores extremos se contabilizó temporalmente, donde las series de precipitación fueron divididas en 5 intervalos de 21 años entre 1901 y 2005.

Positive and negative extreme values sum ( $\pm 1$  and  $\pm 2$  standard deviation) of annual and seasonal precipitation. The precipitation series has been divided in 5 intervals with 21 years of length using 1901 - 2005 period.



**Figura 5.** A) Correlaciones mensuales entre la precipitación y el Índice de Oscilación del Sur (SOI), EL Índice de Oscilación Antártica (AAO) que reflejan la actividad de los forzantes ENSO y AAO. B) Precipitación acumulada de otoño [MAM] junto a los índices SOI y AAO para igual estación del año. Los valores de los índices de los forzantes climáticos han sido invertidos para facilitar la comparación visual. Los valores han sido expresados en anomalías estandarizadas. Correlaciones mensuales y estacionales fueron significativas ( $P < 0,05$ ) a un  $r$  crítico  $= \pm 0,26$  en relación al periodo de comparación 1948 - 2005.

A) Monthly correlations between instrumental precipitation records with the SOI index of ENSO and the Antarctic Oscillation index (AAO) for their common 1948–2005 period. Dashed horizontal lines indicate statistical significance at  $P < 0,05$ . B) Autumn cumulative precipitation series [MAM], SOI of ENSO and AAO index on the same season. The climate forcing indexes have been inverted to facilitate the comparison. Values were expressed on standardized anomalies. Correlation was significant with a critical  $r = \pm 0,26$  ( $P < 0,05$ ).

**Cuadro 2.** Correlaciones entre la precipitación estacional y los forzantes climáticos AAO y SOI de ENSO. El periodo de análisis fue 1948 – 2005, periodo común de las tres series de tiempo. El valor crítico de correlación para los 58 años fue de  $r = \pm 0,26$ ,  $P < 0,05$ .

Correlations between seasonal precipitation and climate forcing indices AAO and SOI of ENSO. The comparative period was 1948 – 2005. Critical Pearson  $r$  of correlation for 58 years was  $r = \pm 0,26$ ,  $P < 0,05$ .

| Estación del año | AAO         | SOI       |
|------------------|-------------|-----------|
| Verano           | -0,22       | 0,182     |
| Otoño            | -0,44 (***) | -0,27 (*) |
| Invierno         | -0,01       | -0,31(*)  |
| Primavera        | -0,21       | -0,43(**) |

\* =  $P < 0,05$  , \*\* =  $P < 0,01$ , \*\*\* =  $P < 0,001$

El Niño los que se relacionan con bajas precipitaciones en dichos meses. En el caso del índice AAO, éste presentó una correlación negativa y significativa solo con la estación de otoño ( $r = -0,44$ ,  $P < 0,05$ ), indicando que un aumento en las presiones en latitudes medias ( $\sim 45^{\circ}$  S) se asocia mayormente con bajas precipitaciones en la zona. Únicamente en la estación de otoño la precipitación registró una relación significativa con ambos forzantes (figura 5B). Esta fue la única estación que presentó reducciones significativas durante el siglo XX ( prueba de Mann-Kendall).

## DISCUSIÓN

*Validación de la precipitación de Valdivia en el periodo Anwandter y su relación con otros registros pluviométricos históricos y anillos de crecimiento de A. araucana.* La escasez de registros de precipitación cercanos a Valdivia y anteriores a 1880 dificultó la evaluación de los registros de la estación de Valdivia en el periodo Anwandter (1853 - 1879). Sin embargo, la relación entre la cronología de ancho de anillos de *A. araucana* con la precipitación anual del periodo instrumental reciente (post-1950) de esta ciudad y el registro de Anwandter, sugieren que este último posee una alta coherencia temporal en su variabilidad interanual (figura 2B). El uso de cronologías de ancho de anillos de esta especie, en conjunto con otros registros históricos de precipitación instrumental, fueron útiles para completar el registro de precipitación anual de Valdivia entre 1880 y 1899, proveyendo de un registro de precipitación anual continuo de 153 años para esta ciudad, siendo el más extenso de Chile. Futuros trabajos de recopilación de información climática pre-1900, y el desarrollo de nuevas reconstrucciones climáticas en la zona, podrían permitir corroborar esta serie de precipitación, especialmente en lo relacionado a la magnitud de los montos del periodo relleno pre-1900.

El uso de cronologías de ancho de anillos de *Araucaria araucana* en este trabajo, ratifica el potencial de esta especie para el desarrollo de reconstrucciones climáticas en Chile. Esta conífera ya había demostrado su capacidad para desarrollar reconstrucciones hidroclimáticas de más de quinientos años en Argentina (Holmes *et al.* 1979, Mundo *et al.* 2012), y recientemente también de forzantes climáticos como el AAO (Villalba *et al.* 2012). El uso de especies arbóreas longevas como *A. araucana* y *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic. Ser. et Biz. (ciprés de la cordillera), o que su madera puede permanecer por largo tiempo sin descomponerse después de muerto el árbol, como *Pilgerodendron uviferum* (D. Don) Florin (ciprés de Las Guaitecas), sensibles a las variaciones climáticas, podrían permitir el desarrollo de largas reconstrucciones hidroclimáticas en el centro-sur de Chile y en toda la eco-región valdiviana, favoreciendo la evaluación de los cambios en el clima reciente y su potencial efecto sobre los ecosistemas de la zona. Esta información puede ser valiosa especialmente para el desarrollo de modelos climáticos predictivos y adaptativos en la región, especialmente ante riesgos de sequías.

*Cambios en la precipitación de Valdivia: tendencias y valores extremos.* La tendencia de reducción de las precipitaciones en el periodo anual fue significativa durante el periodo 1901 - 2005 (Mann-Kendall;  $P < 0,01$ ). Esta tendencia ya ha sido descrita en otros estudios que han analizado la precipitación en Chile, demostrando que la estación de Valdivia junto a otras estaciones presentan marcadas tendencias decrecientes durante las últimas décadas (Quinta-

na 2004). En el análisis estacional post-1901, la reducción de precipitaciones en Valdivia ocurrió en todas las estaciones del año, siendo en otoño e invierno más marcadas, alcanzando en otoño una tendencia significativa (Mann-Kendall,  $P < 0,05$ ). La importancia de estas dos estaciones del año, radica en que juntas aportan en promedio más del 70 % al total anual de precipitaciones. Esto también fue sugerido por Trenberth *et al.* (2007), quienes observaron que las tendencias en la precipitación de Valdivia se enmarcan dentro de una reducción regional de la precipitación registrada en gran parte de la zona centro-sur de Chile para los últimos 100 años, acentuada en la estación otoñal. Sin embargo, considerando el registro completo de precipitación de Valdivia (1853 - 2005), el cual incluye el periodo relleno (1880 - 1899), también se identificó una marcada y significativa reducción de la precipitación anual desde mediados del siglo XIX.

Otro importante patrón observado en este estudio fue el cambio en la frecuencia e incremento de valores extremos de bajas precipitaciones durante el siglo XX, los cuales se acentúan en la segunda mitad del siglo. Estos resultados son coherentes con reconstrucciones hidroclimáticas (caudales, índices de aridez) desarrolladas utilizando anillos de crecimiento de árboles, como las desarrolladas para el río Maule y el índice de aridez de Palmer (PDSI), en las cuales el siglo XX presentó un mayor número de sequías intensas en relación a tres y seis siglos anteriores, respectivamente (Christie *et al.* 2011, Urrutia *et al.* 2011).

A escala global, los cambios registrados en la tendencia y distribución anual y estacional de valores extremos en la precipitación de Valdivia, estarían explicados en parte por un debilitamiento de los vientos zonales u “oestes” en las zonas de latitud media (zonas templadas), con un desplazamiento e intensificación hacia las altas latitudes o zonas polares (Toggweiler 2009), especialmente en el otoño e invierno donde dichos vientos se desplazan desde las zonas polares hacia las latitudes medias. Estos vientos presentan una estrecha relación con la precipitación del centro-sur de Chile y Patagonia. Moy *et al.* (2009) reportaron altos valores de correlación entre los vientos zonales y la precipitación anual ( $r > 0,5$ ) de Puerto Montt ( $41^{\circ} 30' S$  y  $73^{\circ} 7' O$ ), utilizando el periodo 1983 - 2003. La estación de Puerto Montt presenta además una fuerte correlación ( $r = 0,71$ ,  $P < 0,001$ ) con la estación de Valdivia (Isla Teja) en un periodo de 93 años (ver figura 1A), lo cual sugiere una similar influencia de estos vientos sobre la precipitación de Valdivia.

*Influencia de forzantes climáticos de gran escala sobre la precipitación de Valdivia.* Las relaciones entre la precipitación de Valdivia y los forzantes climáticos de gran escala que afectan el clima de la región no fueron muy claras, presentando correlaciones significativas pero débiles ( $P < 0,05$ ). Forzantes climáticos originados en bajas latitudes, como ENSO, y en medias y altas latitudes polares, como AAO, presentan un efecto mixto en el clima de la región (Garreaud *et al.* 2009). En esta zona, ambos for-

zantes se encuentran en el límite de su influencia climática directa, más fuerte en zonas tropicales y subtropicales en el caso de ENSO (*e.g.* clima mediterráneo en Chile), y en la zona austral y polar del hemisferio Sur en el caso del AAO (*e.g.* clima templado en Chile).

Las correlaciones mensuales obtenidas entre la precipitación y los forzantes climáticos indicarían que la actividad de ENSO influye en la precipitación de la mayoría de las estaciones del año. Sin embargo la Oscilación Antártica influiría mayormente sobre la precipitación de fines de verano (marzo) y especialmente de los meses de otoño. La inversa y significativa relación entre la precipitación de Valdivia y el AAO concuerdan con los resultados mostrados por Garreaud *et al.* (2009) en esta latitud (~ 40° S). En adición, Lara *et al.* (2008) también mostraron una relación significativa entre el aumento de la fase positiva del AAO y la reducción en las descargas del Río Puelo (42° S) durante las últimas décadas. Los mismos autores sugieren una fuerte influencia de este forzante en la variación de baja frecuencia del caudal. Esto indicaría que posiblemente el AAO controle mayormente la variación de baja frecuencia de la precipitación de Valdivia, sin embargo, la escasa longitud de la serie del AAO (post-1948) no ha permitido su evaluación en el largo plazo. Futuros estudios podrían evaluar las relaciones entre la precipitación y las nuevas reconstrucciones de la Oscilación Antártica a partir de anillos de árboles (Villalba *et al.* 2012). Contrariamente, en el caso de ENSO, la relación negativa y significativa obtenida entre el índice SOI y las estaciones invierno, primavera y también otoño, confirmarían una fuerte presencia de la actividad del forzante, el cual podría estar modulando mayormente la variabilidad interanual (alta frecuencia) de la precipitación en la zona, como ha sido sugerido por varios autores (Montecinos y Aceituno 2003, Garreaud *et al.* 2009). No obstante, es posible que ambos forzantes actúen de forma semi-estacionaria, manteniendo un efecto dinámico sobre los centros de presiones, especialmente en medias latitudes. Esto también explicaría que una mayor recurrencia de la fase El Niño de ENSO post-1976 podría asociarse en parte el aumento de valores extremos de bajas precipitaciones al final del siglo XX. La actividad de ENSO ha sido responsable de los valores más anómalos según varios de los registros instrumentales a lo largo de Chile (Montecinos y Aceituno 2003, Garreaud *et al.* 2009). No obstante, la variabilidad de las precipitaciones de Valdivia podría estar condicionada por la influencia combinada de ambos forzantes climáticos. Análisis regionales del clima de Sudamérica indican que el AAO generaría una fuerte modulación en la señal producida por ENSO sobre la precipitación, lo cual vuelve aun más compleja una interpretación separada del efecto de estos forzantes sobre la precipitación (Garreaud *et al.* 2009). En la precipitación de Valdivia, parece ser que el incremento de valores extremos negativos registrados en la segunda mitad del siglo XX estaría relacionado con una combinación entre un incremento en la señal de la Oscilación Antártica y una predominancia de la fase El Niño dentro de la actividad ENSO en las últimas décadas (Garreaud *et al.* 2009).

**Efectos de la reducción de precipitaciones en ecosistemas boscosos de la región.** En la ecorregión valdiviana, varias de las especies arbóreas que crecen a mayor altitud y en extremos de gradientes ambientales, como son *A. araucana*, *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) (lenga; distribución norte), *Austrocedrus chilensis*, han mostrado una reducción de sus tasas de crecimiento, especialmente en sitios áridos (Lara *et al.* 2005, Le Quesne *et al.* 2006, Christie *et al.* 2011, Mundo *et al.* 2012). También especies propias de sitios húmedos, como *Pilgerodendron uviferum*, han mostrado reducción en sus tasas de crecimiento asociada a la disminución de precipitaciones en el centro-sur de Chile (Lara *et al.* 2008). Cambios en las tasas de crecimiento en forma sostenida pueden modificar la productividad neta de los ecosistemas modificando a su vez el régimen de nutrientes y la disponibilidad de recursos para animales e insectos.

El efecto de la reducción de precipitaciones también puede observarse en bosques de bajas elevaciones. Una reducción en las poblaciones de roedores nativos en el Bosque Experimental San Martín, ubicado a 15 km de la ciudad de Valdivia, ha sido asociada a un efecto de “secamiento” de parches de bosque por reducción de precipitaciones y aumento de la fragmentación en zonas cercanas a la ciudad de Valdivia (Murúa *et al.* 2005). Corroborando este patrón, en este mismo bosque, resultados preliminares del registro de 27 años de producción de semillas indican que especies como *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst (roble) y *Aextoxicum punctatum* (Ruiz. et Pavón.) (olivillo) podrían estar viendo disminuida su capacidad reproductiva asociado a la reducción de precipitaciones en la región.

Finalmente, la reducción de precipitaciones y el aumento de sequías extremas pueden afectar el régimen de disturbios en ecosistemas ubicados a distintas elevaciones dentro de la región. El control climático sobre estos regímenes se puede observar en el norte de Patagonia (42° S), en la vertiente oriental de Los Andes, en donde las variaciones en la frecuencia de sequías extremas se han vinculado con episodios de mortalidad de *A. chilensis*, mientras períodos húmedos se han vinculado con aumento del establecimiento de esta especie (Villalba y Veblen 1998). Otras grandes consecuencias que podría traer consigo el aumento de sequías extremas en la zona son la mayor frecuencia de incendios forestales y el tamaño del área afectada, la cual podría generar daños severos en los ecosistemas boscosos y áreas silvestres más vulnerables de esta porción de la ecorregión valdiviana. Análisis recientes en extensas redes de cronologías de ancho de anillos del hemisferio sur, han detectado anomalías en el crecimiento de varias especies arbóreas en bosques de Chile, Argentina, Nueva Guinea y Tasmania, lo cual parecería explicarse por cambios recientes en las presiones atmosféricas entre altas y medias latitudes en el hemisferio sur y su efecto sobre los vientos del Oeste (Villalba *et al.* 2012).

## CONCLUSIONES

Un decrecimiento significativo en la precipitación anual, la estación de otoño y los meses de abril y septiembre han sido identificados entre 1901 - 2005, sugiriendo una extensión de las condiciones estivales y una mayor concentración de la precipitación en invierno. Además, gracias al llenado de información entre 1880 - 1899, utilizando información instrumental y anchos de anillos de *A. Araucana* se ha registrado que la reducción de la precipitación en Valdivia ocurre al menos desde el siglo XIX. La precipitación de otoño se relacionó negativamente con la Oscilación Antártica en la misma estación del año y a nivel mensual con los meses de febrero y marzo, indicando una mayor permanencia de altas presiones en la zona de Valdivia durante finales del verano y otoño. La actividad de El Niño Oscilación del Sur (índice SOI) presentó correlaciones negativas y significativas con la precipitación de Valdivia, excepto en verano. Los valores extremos de todas las estaciones del año fueron mayormente positivos durante los primeros 50 años del siglo XX, en comparación a la segunda mitad del siglo en la cual fueron mayormente negativos, indicando un aumento de aridez en la región.

Los dos patrones identificados en el análisis de la estación de Valdivia, tanto el decrecimiento significativo de la precipitación durante todo el año pero especialmente en la estación de otoño (prevalencia de condiciones estivales), como el incremento en la frecuencia de sequías extremas en la región, sugieren focalizar estudios futuros hacia la evaluación de la respuesta de distintos componentes de los ecosistemas boscosos de la zona a este tipo de variaciones climáticas. Una mayor cantidad de información específica acerca de estas relaciones ayudará a generar una evaluación más clara y compleja de los potenciales efectos de los cambios climáticos actuales y proyectados para la región.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Robert Brummer del instituto de Geociencias de la Universidad Austral de Chile (UACH) por la información climática suministrada. Por sus sugerencias para mejorar este trabajo, se agradece a: Trevor Walter, Rocío Urrutia, Duncan Christie, Carlos Le Quesne, Horacio Samaniego y a dos revisores anónimos. También a Mauro E. González y al Laboratorio de Dendrocronología y Cambio Global de la Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales de la UACH por el apoyo en la preparación de cronologías de ancho de anillos.

## REFERENCIAS

- Aceituno P. 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Monthly Weather Review* 116: 505-524.
- Aceituno P, MDR Prieto, ME Solari, A Martínez, G Poveda, M Falvey. 2008. The 1877-1878 El Niño episode: associated impacts in South America. *Climatic Change* 92: 389-416. DOI 10.1007/s10584-008-9470-5.
- Aravena JC, B Luckman. 2009. Spatio-temporal rainfall patterns in Southern South America. *International Journal of Climatology* 29: 2106-2120.
- Christie DA, J Boninsegna, M Cleaveland, A Lara, C Le Quesne, M Morales, M Mudelsee, D Stahle, R Villalba. 2011. Aridity changes in the Temperate-Mediterranean transition of the Andes since AD 1346 reconstructed from tree-rings. *Climate Dynamics* 36: 1505-1521.
- Holmes R, C Stockton, V LaMarche. 1979. Extension of river flow records in Argentina from long tree-ring chronologies. *Journal of the American Water Resources Association* 15: 1081-1085.
- Holmes R. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43: 69-75.
- Garreaud R, M Vuille, R Compagnucci, J Marengo. 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281: 180-195.
- Lara A, R Villalba, A Wolodarsky-Franke, JC Aravena, B Luckmann, E Cuq. 2005. Spatial and temporal variation in *Nothofagus pumilio* growth at tree line along its latitudinal range (35° 40'-55° S) in the Chilean Andes. *Journal of Biogeography* 32: 879-893.
- Lara A, R Villalba, R Urrutia. 2008. A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer-fall streamflow in the Valdivian Rainforest eco-region, Chile. *Climatic Change* 86: 331-356.
- Le Quesne C, D Stahle, M Cleaveland, MD Therrell, JC Aravena, J Barichivich. 2006. Ancient Austrocedrus treering chronologies used to reconstruct central Chile precipitation variability from a.d. 1200 to 2000. *Journal of Climate* 19: 5731-5744.
- Luebert F, P Pliscoff. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Valdivia, Chile. Universitaria. 316 p.
- Montecinos A, P Aceituno. 2003. Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate* 16: 281 - 296.
- Moy C, P Moreno, R Dumbar, M Kaplan, JP Francois, R Villalba, T Haberzettl. 2009. Climate change in Southern South America during the last two Millennia. In Vimeux F, F Silvestre, M Khody eds. Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions. Springer. p. 353 - 395.
- Mundo I, MH Masiokas, R Villalba, M Morales, R Neukom, C Le Quesne, RB Urrutia, A Lara. 2012. Multi-century tree-ring based reconstruction of the Neuquén River streamflow, northern Patagonia, Argentina. *Climate of the Past* 8: 815-829.
- Murúa R, L González, M Briones. 2005. Cambios en el ensamble de micromamíferos durante la sucesión secundaria en un bosque costero de Valdivia, Chile. In Smith - Ramírez C, J Armesto, C Valdovinos eds. Historia, Biodiversidad y Ecología de los bosques costeros de Chile. Santiago, Chile. Universitaria. p. 516-532.
- Myers N, A Mittermeier, C Mittermeier, G da Fonseca, J Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853-858.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, US). 2011. SOI y AAO Index. Consultado 12 abril 2011. Disponible en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>
- Olson D, E Dinerstein. 2002. The global 200 Priority ecoregions for global conservation. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 89: 171-189.

- Garden 89: 199-224.
- Quintana J. 2004. Estudio de los factores que explican la variabilidad de la precipitación en Chile en escalas de tiempo interdecadal. Tesis Magíster en Ciencias mención Geofísica. Santiago, Chile. Departamento de Geofísica Universidad de Chile. 88 p.
- Thompson D, JM Wallace. 2000. Annular modes in the extra-tropical circulation, Part I: Month-to-month variability. *Journal of Climate* 13:1000-1016.
- Toggweiller J. 2009. Shifting Westerlies. *Nature Geoscience* 323: 1435.
- Trenberth, K, PD Jones, P Ambenje, R Bojariu, D Easterling, A Klein Tank, D Parker, F Rahimzadeh, JA Renwick, M Rusticucci, B Soden, P Zhai. 2007. Observations: surface and atmospheric climate change. In Solomon S, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, KB Averyt, M Tignor, HL Miller eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. Cambridge, UK. Cambridge University Press. p. 237-336.
- Urrutia R, A Lara, R Villalba, D Christie, C Le Quesne, A Cuq. 2011. Multicentury tree ring reconstruction of annual streamflow for the Maule River Watershed in South Central Chile. *Water Resources Research* doi:10.1029/2010WR009562
- Villalba R, T Veblen. 1998. Influence of large-scale climatic variability on episodic tree mortality in northern Patagonia. *Ecology* 79: 2624-2640.
- Villalba R, E Cook, G Jacoby, R.D Arrigo, T.T Veblen, P.D Jones. 1998. Tree-ring based reconstructions of northern Patagonia precipitation since AD 1600. *The Holocene* 8: 659-674.
- Villalba R, A Lara, M.H Masiokas, R Urrutia, BH Luckman, GJ Marshall, I Mundo, DA Christie, E Cook, R Neukom, K Allen, P Fenwick, JA Boninsegna, AM Srur, MS Morales, D Araneo, JG Palmer, E Cuq, JC Aravena, A Holz, C Le Quesne. 2012. Unusual Southern Hemisphere tree growth patterns induced by changes in the Southern Annular Mode. *Nature Geoscience*: 5: 793-798. doi: 10.1038/NGEO1613

Recibido: 10.08.12

Aceptado: 21.06.13