



Bulletin de l'Institut français d'études andines

ISSN: 0303-7495

secretariat@ifea.org.pe

Institut Français d'Études Andines

Organismo Internacional

Villalba, Ricardo; Grau, H. R.; Boninsegna, J.; Ripalta, A .
Intensificación de la circulación atmosférica meridional en la región subtropical de América del sur
inferida a partir de registros dendroclimatológicos
Bulletin de l'Institut français d'études andines, vol. 27, núm. 3, 1998
Institut Français d'Études Andines
Lima, Organismo Internacional

Available in: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12627321>

- How to cite
- Complete issue
- More information about this article
- Journal's homepage in redalyc.org

redalyc.org

Scientific Information System
Network of Scientific Journals from Latin America, the Caribbean, Spain and Portugal
Non-profit academic project, developed under the open access initiative

INTENSIFICACIÓN DE LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA MERIDIONAL EN LA REGIÓN SUBTROPICAL DE AMÉRICA DEL SUR INFERIDA A PARTIR DE REGISTROS DENDROCLIMATOLÓGICOS

Ricardo VILLALBA * ***, H.R. GRAU **, J.A. BONINSEGNA ***, A. RIPALTA ***

Resumen

El principal objetivo de este estudio es demostrar la aplicabilidad de los registros dendrocronológicos para caracterizar las variaciones climáticas que, durante los últimos dos siglos, han afectado la región subtropical montano de América del Sur, al este de los Andes. Cronologías de ancho de anillos derivadas a partir del nogal criollo (*Juglans australis*) y del cedro tucumano (*Cedrela lilloi*) han sido usadas para estimar las variaciones regionales de la temperatura y la precipitación desde el año 1800, aproximadamente. Las series de anchos de anillos con respuesta a la precipitación muestran, al igual que los datos instrumentales, un incremento sostenido en las precipitaciones de la región montaña subtropical desde aproximadamente 1950, el cual es totalmente anómalo en el contexto histórico de los últimos 200 años. El gradiente de presión atmosférica entre las regiones tropical y subtropical de América del Sur, medido por la diferencia de presión entre Cuiabá (15° S) y Reconquista (29° S), se ha intensificado progresivamente a partir de 1950. Esta intensificación del gradiente de presión, en combinación con un aumento de las temperaturas en el subtrópico, parece haber inducido una migración latitudinal hacia el sur de la celda continental de baja presión sobre América del Sur, con el consiguiente aumento de las precipitaciones y la reducción del período seco anual en el subtrópico montano. Los patrones espaciales de correlación entre el ancho de anillos y la temperatura del mar, indican que el incremento en las precipitaciones también respondería a un aumento sostenido de la temperatura en el océano Atlántico Sur, desde aproximadamente 1950. Estos resultados dan cuenta de la gran potencialidad de los registros dendrocronológicos para reconstruir las variaciones climáticas en el subtrópico y establecer sus relaciones con los cambios en la circulación atmosférica a nivel continental.

Palabras claves: *Dendroclimatología, cambio climático, circulación atmosférica, precipitaciones, América del Sur.*

* Tree-Ring Laboratory, Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, P.O. Box. 1000, Palisades, NY 10964 USA, e-mail: ricardo@ldeo.columbia.edu

** Department of Geography, University of Colorado at Boulder, Campus Box 260, CO 80309, USA.

*** Laboratorio de Dendrocronología, IANIGLA, C.C. 330, 5500 Mendoza, Argentina.

RENFORCEMENT DE LA CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE MÉRIDIONALE D'AMÉRIQUE DU SUD DÉDUITE DE DONNÉES DENDROCLIMATOLOGIQUES

Résumé

L'objectif principal de cette étude est de montrer comment on peut utiliser la dendroclimatologie pour caractériser les variations climatiques qui ont affecté ces deux derniers siècles la région subtropicale de montagne de l'Amérique du Sud. Nous avons utilisé des chroniques de largeur d'anneaux de croissance obtenues sur du nogal *criollo* (*Juglans australis*) et du Cèdre Tumaco (*Cedrela lilloi*) pour estimer les variations mensuelles de température et de précipitation depuis 1800. Comme les mesures météorologiques directes, les séries dendroclimatologiques sensibles aux précipitations montrent un accroissement soutenu des précipitations dans la région montagneuse subtropicale qui démarre vers 1950, que l'on n'avait pas du tout observé au cours des 200 années précédentes. Le gradient de pression atmosphérique entre les régions tropicales et subtropicales mesuré par les différences de pression entre Cuiabá (15°S) et Reconquista (29°S) s'est accru progressivement depuis 1950. Ce renforcement du gradient de pression, associé à une augmentation des températures dans les zones subtropicales paraît avoir induit un déplacement vers le sud de la cellule continentale de basse pression sur l'Amérique du Sud. Ce déplacement pourrait avoir provoqué une augmentation des précipitations et une réduction de la durée de la saison sèche dans le subtropique montagneux. Les corrélations spatiales entre l'épaisseur des anneaux de croissance et la Température de Surface de l'Océan (SST) indiquent également que l'augmentation des précipitations subtropicales pourrait aussi être reliée à une augmentation significative de la SST de l'Atlantique sud survenue au cours des 4 dernières décades. Ces résultats montrent de manière claire le potentiel des méthodes dendroclimatologiques pour reconstituer les variations du climat dans les zones subtropicales et établir les relations avec les changements survenus dans la circulation atmosphérique à l'échelle du continent.

Mots-clés : *Dendroclimatologie, changement climatique, circulation atmosphérique, précipitations, Amérique du Sud.*

INTENSIFICATION OF MERIDIONAL CIRCULATION IN THE SOUTH AMERICAN SUBTROPICS INFERRED FROM TREE-RING RECORDS

Abstract

The main goal of this study is to show the use of tree-ring records to properly characterize the climatic changes which have affected the South American subtropics during the past two centuries. Tree-ring width chronologies from nogal *criollo* (*Juglans australis*) and cedro *tucumano* (*Cedrela lilloi*) have been used to estimate regional changes in temperature and precipitation since 1800. Similar to instrumental records, precipitation-sensitive chronologies indicate a steady increase of precipitation in the subtropics starting around 1950. This precipitation increase is unprecedented in the 200-year long tree-ring records. The mean sea-level pressure (MSLP) gradient between the tropics and subtropics, measured as the differences in MSLP between Cuiabá (15° S) and Reconquista (29° S), shows a increase since about 1950. This intensification of the pressure gradient, together with an increase in temperatures at the subtropics, appears to have induced a southward shift of the continental low pressure cell over South America. This southward displacement of the low pressure cell may have increased precipitation and reduced the extent of the dry season in the subtropics. Spatial correlation patterns between tree rings and sea-surface temperatures (SST) indicate that subtropical precipitation changes may also be related to a steady increase in SST in the South Atlantic during the past four decades. These results consistently show the large potential of tree-ring records to reconstruct climatic variations in the subtropics and to establish the relationships between regional climate and large-scale climatic forcings.

Key words: *Tree-ring records, Climatic change, Atmospheric circulation, Rainfall, South America.*

INTRODUCCIÓN

Los estudios dendrocronológicos en las regiones tropicales y subtropicales son muy escasos (Stokes & Smiley, 1968; Boninsegna & Villalba, 1996). Esto se debe principalmente a que la mayoría de los árboles tropicales no forman bandas de crecimiento, o cuando estas bandas están presentes en el leño, su formación no responde a un ciclo anual (más de una banda puede formarse por año, por ejemplo, en respuesta a cortos períodos húmedos a lo largo del ciclo anual). Ocasionalmente, estas bandas de crecimiento son parciales, formándose sólo en algunos sectores del tronco. La ausencia de estacionalidad térmica, propia de las regiones tropicales, pareciera ser la causa de la falta de bandas de crecimiento bien demarcadas en la mayoría de los árboles que crecen en estas regiones (Jacoby, 1989; Worbes, 1995). No obstante, existen regiones tropicales y subtropicales que experimentan una moderada estacionalidad en temperatura, y más comúnmente, una fuerte estacionalidad en las precipitaciones. Este tipo de estacionalidad climática que ocurre en las regiones tropicales puede inducir algún período de dormancia en el crecimiento y la formación de anillos anuales bien definidos.

La región montano subtropical del noroeste argentino (20 a 28°S) experimenta una marcada estacionalidad en las precipitaciones (80% de la precipitación ocurre en verano), así como una moderada estacionalidad en la temperatura. Anillos de crecimiento claramente demarcados han sido identificados en dos especies de la selva subtropical de montaña del noroeste argentino: nogal criollo (*Juglans australis* Griseb.) y cedro tucumano (*Cedrela lilloi* C.DC), las cuales fueron empleadas para elaborar las primeras cronologías de anillos de árboles en la región subtropical andina de América del Sur (Villalba *et al.*, 1986; 1987; 1992). La mayoría de las cronologías cubren los últimos 150-200 años, pero algunas de ellas alcanzan 300 años de extensión. En este estudio, las cronologías subtropicales son empleadas para caracterizar las variaciones climáticas que han ocurrido recientemente en el noroeste argentino en el contexto de los últimos dos siglos. Así por ejemplo, los registros dendrocronológicos indican que el aumento reciente de las precipitaciones es un fenómeno totalmente anómalo en el contexto de los últimos 200 años. Estos cambios climáticos en la vertiente oriental de la región montano subtropical estarían asociados a un desplazamiento latitudinal de la celda de baja presión sobre América del Sur, muy posiblemente en respuesta a un mayor aumento de la temperatura en latitudes medias en relación a los trópicos. El patrón espacial de correlación entre la precipitación del subtrópico montano y la temperatura de superficie del Océano Atlántico, también indicaría que el aumento sostenido en la precipitación podría responder a un incremento reciente de la temperatura en el Atlántico Sur.

1. DESARROLLO DE LAS CRONOLOGÍAS DE ANCHO DE ANILLOS

Los estudios dendrocronológicos en la Selva de Montaña del noroeste argentino (22-28°S, Fig. 1) se iniciaron en los comienzos de la década de 1980, como parte de un

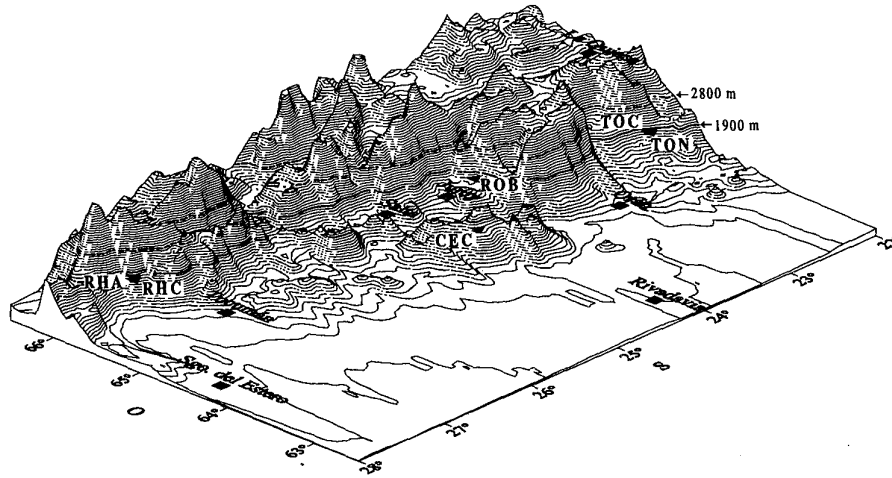


Fig. 1 - Block diagrama del noroeste de Argentina en el cual se indica la posición topográfica de las cronologías de ancho de anillos (triángulos) y las estaciones meteorológicas (rectángulos) empleados en este estudio. Las isolíneas de 1 900 m (línea punteada gruesa) corresponden aproximadamente al límite superior del bosque continuo y discontinuo (o en manchones), respectivamente. Los nombres completos de los sitios identificados con 3 letras en esta figura, están listados en la Tabla 1.

Tabla 1 - Sitios de muestreo.

| Código | Nombre | Especie | Lat. S | Long. W | Elev. (m) | Pen- diente (°) | Expo- sición del sitio | Caracte- rísticas del sitio |
|--------|--------------|--------------------------|-----------|------------|--------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| TON | Los Toldos | <i>Juglans australis</i> | 22°19' | 64°40' | 1875 | 14 | E | seco/ mésico |
| TOC | Los Toldos | <i>Cedrela lilloi</i> | 22°19' | 64°41' | 2025 | 26 | E-SE | seco |
| ROB | Río Bolsas | <i>Juglans australis</i> | 23°55' | 65°19' | 1850 | 23 | S-SW | mésico |
| CEC | Cerro Chañar | <i>Cedrela lilloi</i> | 24°36' | 64°35' | 1700 | 18 | SE | seco |
| RHA | Río Horqueta | <i>Juglans australis</i> | 27°10' | 65°53' | 1800 | 16 | SE | húmedo |
| RHC | Río Horqueta | <i>Cedrela lilloi</i> | 27°10' | 65°52' | 1650 | 18 | S-SE | húmedo |

programa nacional destinado a extender geográficamente la red de cronologías de ancho de anillos existente en el extremo sur de América del Sur (Villalba *et al.*, 1986; 1987; 1992). Del conjunto de especies leñosas de la región, dos árboles, el nogal criollo (*Juglans australis* Griseb.) y el cedro tucumano (*Cedrela lilloi* C.DC), fueron seleccionadas por presentar buenas características dendrocronológicas. Estas especies poseen anillos de crecimiento claramente demarcados, buena uniformidad circular y ejemplares con una longevidad mayor de 200 años. Asimismo, el porcentaje de anillos ausentes en estas dos especies es relativamente bajo. En el campo, las muestras leñosas fueron tomadas con barrenos de incremento, que no producen ninguna alteración en el crecimiento de los árboles muestrados.

Las cronologías de ancho de anillos fueron elaboradas siguiendo los procedimientos comúnmente aplicados en dendrocronología. En el laboratorio, las muestras fueron montadas sobre regletas de madera y pulidas muy prolijamente con lijas de granos progresivamente más finos. Los anillos de crecimiento fueron correctamente datados al año de formación y finalmente medidos con una precisión de 0,01 mm. Las series de ancho de anillos resultantes fueron estandarizadas para reducir a un mínimo aquellas tendencias en el crecimiento que no son comunes a todos los árboles (Fritts, 1976; Cook, 1985). Las series estandarizadas fueron promediadas para obtener una cronología en cada uno de los sitios muestreados. En consecuencia, cada cronología constituye una serie temporal que representa las variaciones anuales en el crecimiento radial de los árboles de una especie, en un sitio en particular, a través del tiempo. Mayores detalles sobre los métodos empleados para desarrollar las cronologías se encuentran en Villalba *et al.* (1992; 1997). Hasta el presente se han elaborado 15 cronologías de ancho de anillos en la región montano subtropical argentina. Para este estudio se seleccionaron 6 cronologías, cuyos anillos de crecimiento reflejan claramente las variaciones anuales en el clima regional (Fig. 2).

2. RELACIONES ENTRE EL CLIMA Y EL CRECIMIENTO RADIAL

Las variaciones en el espesor de anillos fueron comparadas con registros locales de temperatura y precipitación para determinar, en cada uno de los sitios muestreados, qué variables climáticas estaban más fuertemente relacionadas con el crecimiento de los árboles. Un método simple de comparación es el de la función de correlación (Blasing *et al.*, 1984), que consiste en correlacionar las variaciones en el espesor de los anillos de crecimiento de una cronología con las variaciones climáticas mensuales. Los totales de precipitación mensual fueron tomados de Bianchi & Yañez (1992), y las temperaturas medias mensuales de diferentes publicaciones del Servicio Meteorológico Nacional de Argentina y otras fuentes.

Dada las grandes diferencias ambientales a lo largo de la selva de montaña, se observa una gran variabilidad en la respuesta de los árboles a las fluctuaciones climáticas (Fig. 3). Sin embargo, dos tipos principales de funciones de correlación fueron claramente identificadas. En sectores húmedos próximos al límite superior del bosque, las variaciones en la temperatura de verano están fuertemente relacionadas con el crecimiento de los árboles (Fig. 3). Así por ejemplo, en el sitio del Río Horqueta, a 1 800 m de altura y con precipitaciones cercanas a los 3 000 mm, el crecimiento del nogal

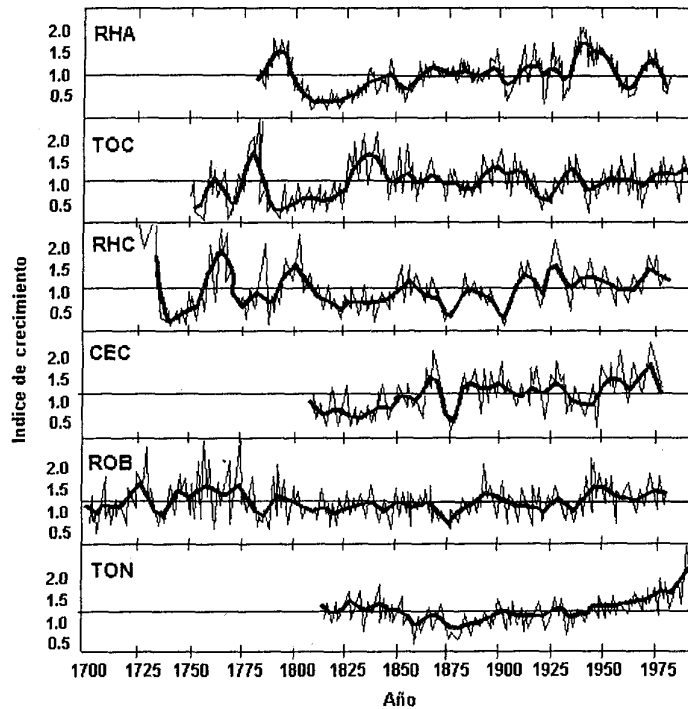


Fig. 2 - Cronologías de ancho de anillos desarrolladas a partir de ejemplares de nogal criollo (RHA, ROB, TON) y cedro tucumano (TOC, RHC, CEC) creciendo en la Selva Subtropical de Montaña del noroeste argentino. El nombre completo de los sitios de muestreo se incluye en la Tabla 1. Con el objeto de resaltar las variaciones de crecimiento en escala de décadas, las cronologías también fueron graficadas en una versión suavizada que resulta de tratar los valores anuales de los índices de anchos de anillos con una función spline de 15 años (Cook & Peters, 1981).

criollo está fuertemente influenciado por las temperaturas de verano. El registro de temperatura más próximo a Río Horqueta es el de la ciudad de Tucumán, localizada al pie de las sierras, 1 400 m por debajo del sitio de muestreo (Fig. 1). No obstante, las variaciones anuales en el espesor de los anillos de crecimiento en Río Horqueta están significativamente correlacionadas con la temperatura de noviembre a enero de Tucumán ($r = 0.51$, $n = 90$, $p < 0.001$). Para la región subtropical andina del norte argentino, la cronología de Río Horqueta muestra que las temperaturas de verano al comienzo del siglo XIX fueron más bajas que en ningún otro momento durante los últimos 200 años (Fig. 4). Luego del importante calentamiento que ocurrió entre 1930 y 1950, las temperaturas disminuyeron con un mínimo alrededor de 1960.

Por el contrario, en aquellos ambientes más secos de la selva de montaña, el crecimiento arbóreo responde a los cambios estacionales y/o anuales en la precipitación (Fig. 3). En Los Toldos, con precipitaciones cercanas a los 1 300 mm, el crecimiento del

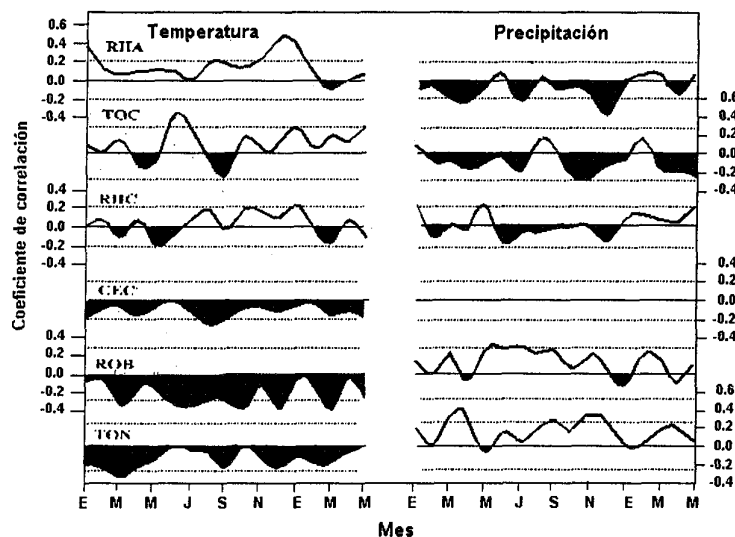


Fig. 3 - Funciones de correlación que muestran las relaciones existentes entre el crecimiento del nogal criollo (RHA, ROB, TON) y el cedro tucumano (TOC, RHC, CEC) con las variaciones mensuales de la temperatura y la precipitación en la Selva subtropical de Montaña del noroeste argentino. Correlaciones positivas indican una relación directa entre el ancho de los anillos y las variaciones climáticas (anillos más anchos corresponden a años con temperatura o precipitación sobre el valor medio). Las líneas de puntos representan el nivel de significancia del 95 %.

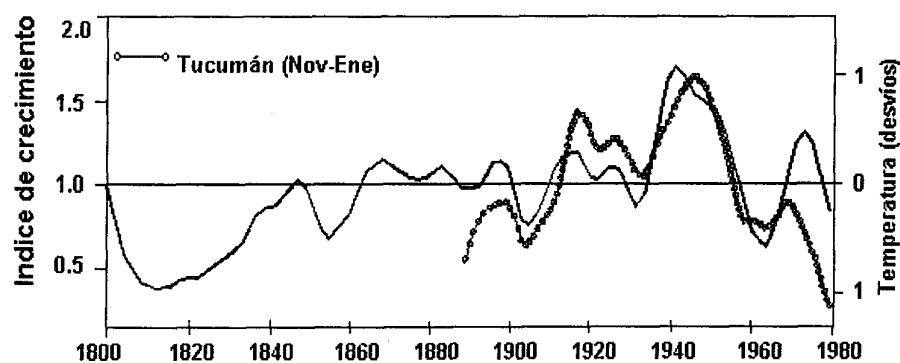
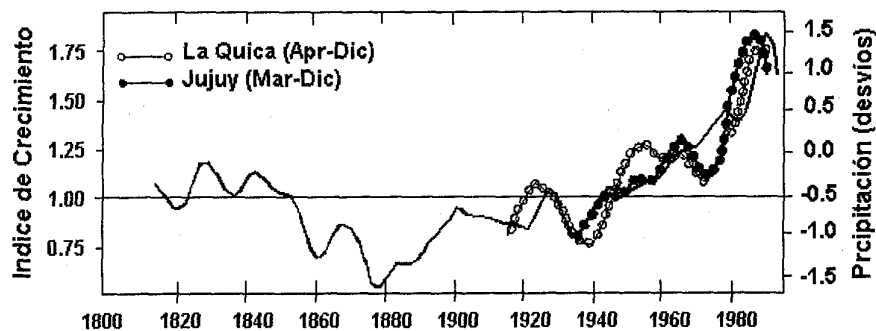


Fig. 4 - Comparación de las fluctuaciones en la temperatura estival de Tucumán (440 m) con el crecimiento del nogal criollo en Río Horqueta (1 850 m). Los anillos de árboles indican que las temperaturas más bajas durante los últimos 200 años se registraron a comienzos del siglo XIX.

nogal criollo responde a las fluctuaciones anuales en la precipitación, particularmente durante el intervalo más seco del año que se extiende desde abril hasta diciembre, cuando comienza el período lluvioso (Fig. 5). La cronología de Los Toldos, así como otras provenientes de los ambientes más secos de la Selva de Montaña, muestran que el crecimiento de los árboles fue persistentemente reducido entre 1850 y 1900, relativamente uniforme hasta 1935 y con una marcada tendencia positiva a partir de 1940 (Fig. 5). Esta tendencia positiva en el crecimiento refleja un aumento en las precipitaciones regionales a partir de 1940. En La Quiaca, a 3 440 m de altura, las precipitaciones durante el invierno y la primavera (abril a diciembre) han aumentado en forma sostenida desde aproximadamente 1940. Esta tendencia positiva en las precipitaciones es aún más evidente en Jujuy, a 1 260 m de altura, donde las precipitaciones durante la estación seca (marzo a diciembre) se han casi duplicado a partir de mediados de 1970 (Fig. 5). Los registros dendrocronológicos indican que este aumento reciente de las precipitaciones en la región subtropical andina de América del Sur, es totalmente anómalo en el contexto de los últimos 200 años.



**Fig. 5 - Comparación de las fluctuaciones de la precipitación en La Quiaca (3 440 m) y Jujuy (1 260 m) con el crecimiento del nogal criollo en Los Toldos (1 875 m).
Nótese el prolongado período de bajo crecimiento entre 1850 y 1900.**

3. CAMBIOS EN LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA Y LA PRECIPITACIÓN EN LA REGIÓN MONTANO SUBTROPICAL

Existe una fuerte variación estacional en la circulación troposférica (250 mb) sobre la región subtropical de América del Sur. La circulación es básicamente meridional durante el verano, pero predominantemente zonal en el invierno (Rao *et al.*, 1996). El flujo de circulación meridional es inducido por el calentamiento de la superficie, y el calor latente liberado por la condensación del vapor de agua a lo largo de la columna troposférica. Este calentamiento produce una celda de circulación térmica que moviliza, a nivel de superficie, masas de aire húmedas desde la región tropical Amazónica y el gran pantanal Boliviano, hacia el noroeste de Argentina. La variación estacional, tanto en la intensidad como en la posición latitudinal de la celda de baja presión sobre el

continente, está relacionada con la distribución espacial y temporal de la precipitación (Prohaska, 1976; Kousky & Kagano, 1981). Cuando la baja continental comienza su expansión hacia el sur, a fines de primavera-comienzos de verano, la advección de masas de aire húmedo se intensifica, dando inicio a la estación húmeda en la zona montana subtropical de los Andes (20-27°S). La duración de este período húmedo decrece hacia el sur y hacia el oeste, reduciéndose solamente al mes de enero en algunas localidades andinas al sur de los 27° S (Prohaska, 1976).

El sostenido aumento de la precipitación desde aproximadamente 1950, observado en los registros instrumentales e inferido a partir de los anillos de los árboles, podría responder a un desplazamiento progresivo hacia el sur de la depresión térmica continental, y la consiguiente intensificación de la circulación meridional sobre la región subtropical, al este de los Andes. La intensificación del transporte de masas de aire húmedo sobre la región subtropical debería reflejarse en el gradiente de presión entre la región baja tropical de Brasil y norte de Bolivia, donde las masas húmedas se originan, y el subtrópico, donde ocurre la precipitación. En general, el desplazamiento progresivo hacia el sur de la celda de baja presión continental respondería a un aumento de la presión atmosférica en bajas latitudes, simultáneamente con una disminución de la presión en latitudes medias de América del Sur. A su vez, este desplazamiento hacia el sur de la celda de baja presión continental podría haber sido facilitado por los cambios diferenciales de temperatura entre la región subtropical, donde se ha observado una tendencia positiva durante las últimas décadas, y la región tropical de América del Sur, donde no hay una tendencia positiva, o inclusive, es negativa en algunas áreas (Nicholls *et al.*, 1995).

El análisis de las tendencias en la presión atmosférica de superficie, empleando aquellas estaciones con registros extensos (período 1900-1993) en América del Sur, muestra un paulatino aumento en la presión atmosférica de aquellas estaciones localizadas en la región tropical (Quixemarobim y Cuiabá), en contraposición con un paulatino descenso de la presión en aquellas estaciones ubicadas en la región subtropical, al este de los Andes (Salta, Asunción, Córdoba y Reconquista). El aumento reciente de las precipitaciones en la región subtropical andina podría responder a este aumento en el gradiente de presión entre las regiones tropicales y subtropicales de América del Sur (Villalba *et al.*, 1997). Las diferencias en las presiones anuales normalizadas entre las estaciones de Cuiabá (15°S) y Reconquista (29°S), que representarían un índice del transporte de humedad entre las regiones tropicales y subtropicales de América del Sur, están significativamente correlacionadas con las variaciones anuales en el crecimiento de los árboles con respuesta a la precipitación ($r = 0.79$, $n = 93$, $p < 0.001$). Los registros dendrocronológicos sensibles a la precipitación (Los Toldos y Cerro El Chañar) coinciden en señalar la década de 1870, como el período con las más escasas precipitaciones durante los últimos 200 años (Fig. 6). Coincidente con las severas sequías en la década de 1870, el gradiente de presión entre las regiones tropicales y subtropicales de América del Sur debería haber alcanzado su mínimo.

El gradiente meridional de la temperatura del mar a lo largo del Atlántico determina la posición de la Zona de Convergencia Intertropical, la que a su vez afecta

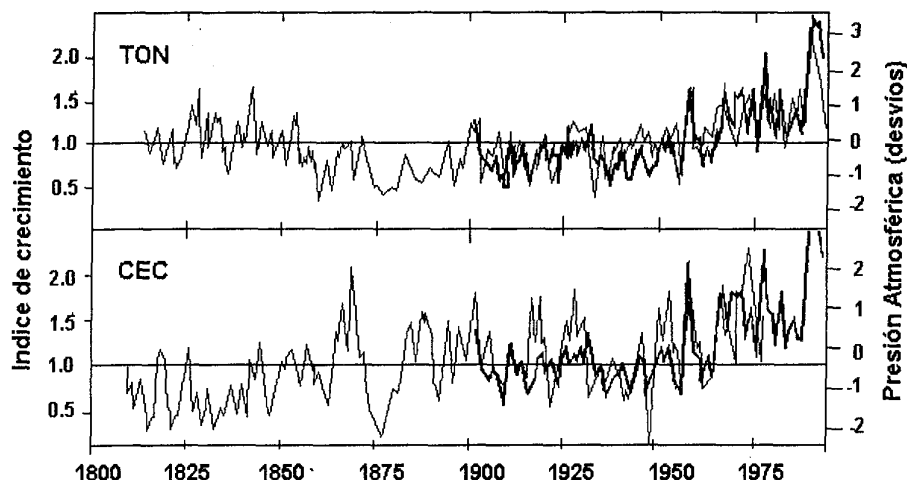


Fig. 6 - Comparación del gradiente de presión entre las regiones tropical y subtropical de América del Sur (línea gruesa), definido como la diferencia de presión entre Cuiabá (15°S) y Reconquista (29°S), con las variaciones en el espesor de los anillos de crecimiento de dos cronologías (línea delgada), con respuesta a la precipitación en la región subtropical montano del noroeste argentino.

la precipitación de las regiones aledañas (Hastenrath, 1995). Basado en los registros de la temperatura del océano Atlántico durante el intervalo 1951-1990, Wagner (1996) notó para los meses del verano austral, un sostenido aumento de las temperaturas del Atlántico Sur en contraposición con una tendencia al enfriamiento en el Atlántico Norte. Como consecuencia de la intensificación del gradiente de temperatura entre los océanos Atlántico Norte y Atlántico Sur, la Zona de Convergencia Intertropical se habría desplazado progresivamente hacia el sur durante el período 1951-1990, con el consiguiente aumento de las precipitaciones estivales en algunas regiones de América del Sur (Wagner, 1996).

Con el fin de establecer si existe alguna conexión entre los cambios observados en la precipitación y en las temperaturas del mar, se procedió a calcular los campos espaciales de correlación entre las temperaturas del mar y las variaciones en la precipitación de la región del subtropical montano. Los campos de correlación, basados en grillas de 5° de latitud por 5° de longitud, fueron calculados para el Océano Atlántico y el sector del Océano Pacífico que va desde los 180° O hasta la costa occidental de las Américas (Fig. 7). Los datos de temperatura del mar fueron tomados de Kaplan *et al.* (1997).

La figura 7a muestra el campo de correlación entre la cronología de Los Toldos y las temperaturas del mar, desde abril a diciembre, calculado en base al intervalo común 1856-1993 (137 años). Las variaciones anuales en el crecimiento de los árboles están positivamente correlacionadas con las temperaturas del Atlántico Sur, particularmente entre los 10 y los 30°S, y negativamente relacionadas con las temperaturas del Atlántico

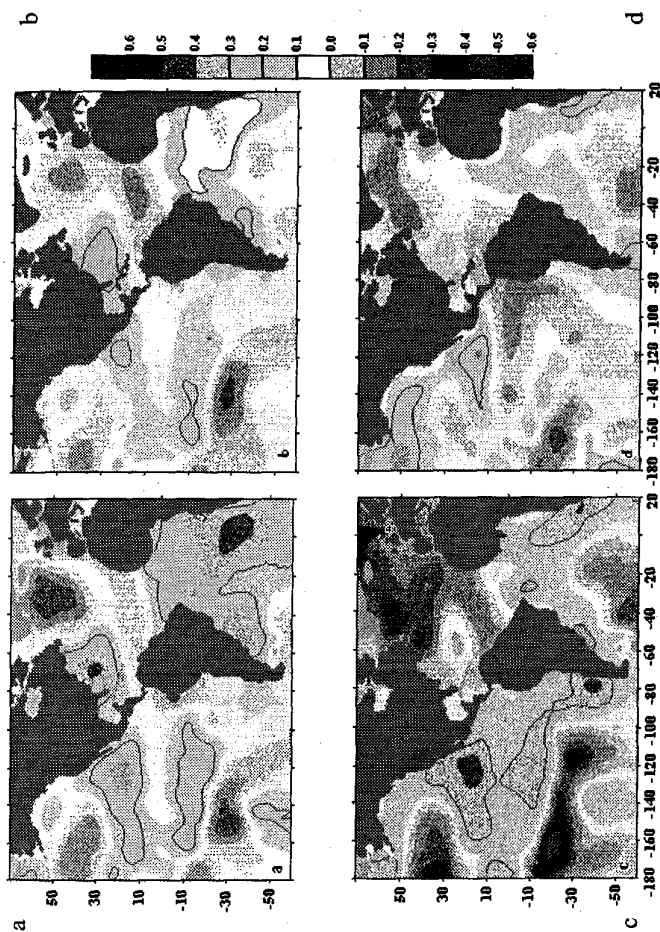


Fig. 7 - Patrones espaciales de correlación entre las temperaturas de superficie del mar (abril a diciembre), en grillas de 5° de latitud x 5° de longitud, con las variaciones en el espesor de los anillos de árboles de la cronología de Los Toldos (triángulos) durante el intervalo 1857-1991 usando las series originales (a) y preblanqueadas (sin autocorrelación (b)). Para comparar con los datos instrumentales, se han incluido en la figura los patrones espaciales de correlación entre las temperaturas del mar y las precipitaciones de Jujuy (c) durante el intervalo 1935-1990, y La Quica (d) para el intervalo 1904-1990. La posición geográfica de las estaciones meteorológicas se indica con puntos blancos. Las líneas negras continuas y no continuas indican las áreas oceánicas significativamente ($p < 0.05$) correlacionadas en forma positiva y negativa, respectivamente, con las precipitaciones en la región subtropical montano de América del Sur.

Norte, con excepción de la región sobre la costa de América del Norte entre los 20 y 40°N de latitud. En comparación con el Océano Atlántico, el campo de correlación sobre el Pacífico es más débil. Dada la fuerte tendencia positiva presente en el registro de ancho de anillos, el campo de correlación fue calculado nuevamente luego de remover las autocorrelaciones presentes, tanto en las series dendrocronológicas como en las temperaturas del mar (Fig. 7b). El patrón espacial resultante es esencialmente el mismo; correlaciones positivas con las temperaturas en el Atlántico Sur y negativas con el Atlántico Norte. Finalmente, los campos de correlación fueron calculados empleando los registros instrumentales de precipitación desde abril hasta diciembre de las estaciones de Jujuy y La Quiaca, para los intervalos 1935-1990 y 1904-1990, respectivamente. El patrón espacial de correlación para la estación de Jujuy (Fig. 7c) es similar al que resulta de emplear los anillos de árboles. La mayor diferencia con el campo de anillos de árboles está dada por una asociación más fuerte entre la precipitación en Jujuy y las temperaturas en el Océano Pacífico. Aún cuando las correlaciones entre la precipitación en La Quiaca con las temperaturas del mar son generalmente no significativas, se mantienen positivas sobre todo el Atlántico Sur (Fig. 7d). Estas diferencias en los campos de correlación podrían obedecer a factores reales impuestos por los diferentes tipos de registros (anillos de crecimiento *versus* registros instrumentales), diferencias en los intervalos de comparación entre los registros de precipitación y el de anillos de árboles con las temperaturas del mar, diferencias en la altura sobre los Andes para los diferentes registros de precipitación (Jujuy a 1 260 m, la cronología de Los Toldos a 1 875 m y La Quiaca a 3 440 m), y diferencias en la localización geográfica de los sitios. La estación meteorológica de La Quiaca está ubicada en un valle interandino, en la sombra de lluvia creada por la Sierra de Santa Victoria (Fig. 1).

En base a un análisis de componentes principales del registro de precipitación de 29 estaciones meteorológicas a lo largo de Bolivia, Ronchail (1995) notó que el principal modo de variación temporal de la precipitación se caracteriza por un aumento sostenido en las precipitaciones desde mediados de 1960. Este modo de variación pluridecenal es más marcado en la región de los llanos Bolivianos, en contacto directo con el subtrópico argentino. Ronchail (1995) atribuye esta tendencia positiva en las precipitaciones a las variaciones decádicas y al comportamiento dipolar de las temperaturas en el océano Atlántico extratropical. Precipitaciones abundantes en Bolivia responderían a una combinación de temperaturas de la superficie de mar bajas en el Atlántico Norte y elevadas en el Atlántico Sur. Los patrones de correlación presentados en la figura 7, estarían indicando que los cambios en el patrón dipolar del océano Atlántico también afectan las fluctuaciones de la precipitación en el subtrópico montano del noroeste de Argentina.

4. CONCLUSIONES

El principal objetivo de este estudio es demostrar la enorme potencialidad que tienen los registros dendrocronológicos para inferir cambios climáticos en la región subtropical de América del Sur. Partiendo de la simple colección de muestras de barreno, se elaboran cronologías de ancho de anillos, que permiten caracterizar las variaciones pasadas de la temperatura y la precipitación con un alto grado de confiabilidad.

A su vez, y dada la extensión temporal de las series dendrocronológicas, éstas pueden proveer una visión completa de los cambios climáticos que han acontecido en el subtropico durante los últimos 200-300 años, o más. Este tipo de perspectiva temporal es imposible de lograr a partir de los registros instrumentales, los que en las regiones tropicales y subtropicales de América del Sur son generalmente cortos, fragmentarios, y no homogéneos.

Para la región subtropical montano del noroeste de Argentina, los registros dendrocronológicos capturan un alto porcentaje de la información contenida en las series instrumentales, tanto de temperatura como de precipitación (Fig. 4 y 5). Asimismo, las series de ancho de anillos muestran una fuerte relación con el gradiente de presión entre las regiones tropicales y subtropicales de América del Sur (Fig. 6) y con las temperaturas del mar, particularmente con las del Océano Atlántico Sur (Fig. 7). La larga perspectiva temporal provista por los registros dendrocronológicos, nos lleva a considerar que el incremento sostenido de las precipitaciones durante las últimas 4 décadas en la región montano subtropical es un fenómeno climático completamente anómalo en el contexto de los últimos 200 años. Forzantes climáticos de tipo continental (la migración hacia el sur de la celda de baja presión sobre América del Sur) como oceánicos (el calentamiento diferencial del Atlántico Norte y Sur) podrían estar asociados con los cambios climáticos observados.

Los géneros *Juglans* y *Cedrela* están ampliamente distribuidos en las regiones tropicales de América Central y del Sur (Manning, 1960; Pennington, 1981). Las especies de estos dos géneros, que crecen en regiones tropicales con una marcada estacionalidad en las precipitaciones, tienen un alto potencial para el desarrollo de registros dendrocronológicos en los trópicos. Estos registros representan una herramienta sumamente útil y práctica para acrecentar nuestro conocimiento en relación al funcionamiento del sistema climático en diferentes escalas temporales. La confección de cronologías de anillos de árboles, extensas y bien replicadas, en la región tropical de América constituye uno de los mayores desafíos en el campo de la dendroclimatología moderna.

Agradecimientos

Los estudios presentados en este trabajo fueron financiados parcialmente por el Consejo Nacional de Ciencias y Técnicas de Argentina (CONICET). RV agradece el apoyo proporcionado por la Universidad de Columbia a través de una beca post-doctoral en el Tree-Ring Laboratory, Lamont-Doherty Earth Observatory, Palisades, Nueva York. HRG agradece el apoyo proporcionado por una beca de la Comisión Fulbright. Este trabajo es una contribución al Proyecto 341 IGCP/IUGS/UNESCO: Southern Hemisphere Paleo- and Neoclimates.

Referencias citadas

- BIANCHI, A.R. & YAÑEZ, C., 1992 - *Las precipitaciones en el noroeste argentino*, 383p.; Salta: INTA, Est. Exp. Reg. Agrop.
- BLASING, T.J., SOLOMON, A.M. & DUVICK, D.N., 1984 - Response functions revisited. *Tree-Ring Bulletin*, **44**: 1-15.
- BONINSEGNA, J.A. & VILLALBA, R., 1996 - Dendroclimatology in the Southern Hemisphere: Review and prospects. in: *Tree Rings, Environment and Humanity* (J.S. Dean, D.M. Meko & T.W. Swetnam ed.): 127-141, *Radiocarbon*.
- COOK, E.R., 1985 - *A time series analysis approach to tree-ring standardisation*. Ph.D. dissertation, University of Arizona, 171p.
- COOK, E.R. & PETERS, K., 1981 - The smoothing spline: a new approach to standardising forest interior ring-width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, **41**: 45-53.
- FRITTS, H.C., 1976 - *Tree rings and climate*; London: Academic Press.
- HASTENRATH, S., 1995 - *Climate Dynamics of the Tropics*; Norwell, Mass.: Kluwer Academic., 2da. ed.
- JACOBY, G.C., 1989 - Overview of tree-ring analysis in tropical regions. *IAWA Bull.*, **10**: 99-108.
- KAPLAN, A., CANE, M.A., KUSHNIR, Y., BLUMENTHAL, B. & RAJAGOPALAN, B., 1996 - Analyses of global sea surface temperature 1856-1991. *Journal of Geophysical Research*, **101**: 22 599-22 617.
- KOUSKY, V.E. & KAGANO, M.T., 1981 - A climatological study of the tropospheric circulation over the Amazon region. *Acta Amazônica*, **11**: 743-758.
- MANNING, W.E., 1960 - The genus *Juglans* in South America and the West Indies. *Brittonia*, **12**: 1-26.
- NICHOLLS, N., GRUZA, G.V., JOUZEL, J., KARL, T.R., OGALLO, L.A. & PARKER, D.E., 1995 - Observed climate variability and change. in: *Climate Change 1995, The science of climate change* (Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N, Kattenberg, A. & Maskell, K., eds.): 130-192; Cambridge University Press.
- PENNINGTON, T.D., 1981 - A monograph of Neotropical Meliaceae. *Flora Neotropica Monograph*, N° **28**, 421p.
- PROHASKA, F., 1976 - The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. in: *Climates of Central and South America* (Schwerdtfeger W., ed): 13-112; World Survey of Climatology, Vol. 12.
- RAO, V.B., CAVALCANTI, I.F.A. & HADA, K., 1996 - Annual variation of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America, *Journal of Geophysical Research*, **101**: 26539-26551.
- RONCHAIL, J., 1995 - Variabilidad interanual de las precipitaciones en Bolivia. *Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines*, **24**(3): 369-378.
- STOKES, M.A. & SMILEY, T.L., 1968 - *An introduction to tree-ring dating*; Chicago, Illinois, USA: University of Chicago Press.
- VILLALBA, R., BONINSEGNA, J.A. & HOLMES, R.L., 1986 - *Cedrela angustifolia* and *Juglans australis*: Two New Tropical Species Useful in Dendrochronology. *Tree-Ring Bulletin*, **45**: 25-36.
- VILLALBA, R., BONINSEGNA, J.A. & RIPALTA, A., 1987 - Climate, site conditions and tree-growth in subtropical north-western Argentina. *Canadian Journal of Forest Research*, **17**: 1527-1544.
- VILLALBA, R., HOLMES, R.L. & BONINSEGNA, J.A., 1992 - Spatial patterns of climate and tree growth variations in subtropical north-western Argentina. *Journal of Biogeography*, **17**: 631-649.

- VILLALBA, R., GRAU, H.R., BONINSEGNA, J.A., JACOBY, G.C. & RIPALTA, A., 1997 - Tree-ring evidence for long-term precipitation changes in subtropical South America. Bajo consideración en *International Journal of Climatology*.
- WAGNER, R.G., 1996 - Decadal-scale trends in mechanisms controlling meridional sea surface temperature gradients in the tropical Atlantic. *Journal of Geophysical Research*, **101**: 16683-16694.
- WORBES, M., 1995 - How to measure growth dynamics in tropical trees. A review. *IAWA Journal*, **16**: 337-351.