

RECONSTRUCCIÓN DE LOS NIVELES DEL RÍO ATRATO CON ANILLOS DE CRECIMIENTO DE *PRIORIA COPAIFERA*

WATER LEVEL RECONSTRUCTION OF THE ATRATO RIVER WITH TREE RINGS OF *PRIORIA COPAIFERA*

DAVID ANDRÉS HERRERA

Ing., Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, zwitterion@gmail.com.

JORGE IGNACIO DEL VALLE

Profesor Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, jidvalle@unal.edu.co

Recibido para revisar Junio 23 de 2011, aceptado Septiembre 1 de 2011, versión final Septiembre 12 de 2011

RESUMEN: La dendrocronología proporciona registros hidroclimáticos sustitutos en regiones poco instrumentadas. En este artículo reconstruimos los niveles del bajo río Atrato y evaluamos el efecto del fenómeno ENSO en los últimos 150 años empleando los anillos de crecimiento de *Prioria copaifera* (cativo). Demostramos la anualidad de los anillos de crecimiento mediante ^{14}C y correlaciones con variables climáticas anuales. Para la reconstrucción de los niveles del Río empleamos 23 series de ancho de anillos y métodos dendrocronológicos estándar para cofechar, eliminar la tendencia del crecimiento, estandarizar las series eliminar la autocorrelación serial y calcular las cronologías Arstan y Residual. Encontramos asociación positiva y significativa ($r=0,589$; $p<0,01$) entre los niveles del Río y el crecimiento del cativo. La cronología residual **Cro4R** correlacionó significativa y positivamente con SOI y, lo opuesto con ONI del ENSO. No encontramos efecto estadísticamente significativo en la tendencia de los niveles del río Atrato durante los últimos 150 años.

PALABRAS CLAVE: *Prioria copaifera*, árboles tropicales, anillos anuales de árboles, dendrohidrología, ENSO.

ABSTRACT: dendrochronology provides hydroclimatic proxy records in many regions with scarcity of instrumental records. In this paper, we reconstructed the Low Atrato River's water levels and assessed the effect of the ENSO phenomenon in the river level over the past 150 years using the tree rings of *Prioria copaifera* tree (Cativo). We demonstrated the annuality of the growth rings by ^{14}C , and by correlations with annual climatic variables. To reconstruct river levels, we used 23 ring width series, and standard dendrochronology methods to cross-dating, detrending, standardize the series, remove the serial autocorrelation, and calculate both Arstan and Residual chronologies. We found positive and significant association ($r=0,589$; $p<0,01$) between water levels and Cativo's growth. Residual chronology **Cro4R** correlated significant and positively with SOI, and the opposite with ONI of ENSO. We found no statistical significant effect on the trend of the Atrato River levels over the past 150 years.

KEY WORDS: *Prioria copaifera*, tropical trees, annual tree-rings, dendrohydrology, ENSO.

1. INTRODUCCIÓN

El clima de la región central de Colombia está estrechamente relacionado con la variabilidad climática del Pacífico, determinada en gran medida por la corriente de chorro superficial del Oeste o “chorro del Chocó” [20]. Además, el occidente del país es más sensible al fenómeno ENSO (*El Niño Southern Oscillation*) por su cercanía al océano Pacífico. Por lo anterior, comprender la dinámica del clima en el Pacífico colombiano permite entender los procesos climáticos de la región central y occidental del país. También contribuye a mejorar la comprensión de la

variabilidad de procesos macroclimáticos como el ENSO en sus dos fases en gran parte de Colombia.

Para comprender mejor el comportamiento de los ríos se requieren registros extensos de variables hidroclimáticas [6]. El río Atrato atraviesa de sur a norte gran parte de las selvas pluviales del Pacífico colombiano, la región más lluviosa de América; por tanto, las alturas limnimétricas históricas de este Río deben reflejar en gran medida la hidroclimatología de esta región, pero solo existen 24 años de registros limnimétricos continuos. Por ello poco entendemos las señales hidroclimáticas del río Atrato, tales como

los efectos de los fenómenos ENSO, sus tiempos de retorno, intensidad y frecuencia actual y secular. Las reconstrucciones dendrohidrológicas permiten comprender mejor estas variables, empleando el ancho de los anillos de los árboles como registros sustitutivos de los instrumentales.

En Colombia el cativo (*Prioria copaifera*) habita las llanuras de desborde del bajo río Atrato. Por tanto, soporta alternativamente períodos de inundación y de estiaje. La anualidad de los anillos de especies tropicales puede estar determinada por las sequías o condiciones hipóxicas anuales que las afectan [26]. Por esta razón, el crecimiento del cativo pudiera estar limitado por la fluctuación anual de los niveles del río Atrato. Para sobrevivir a estas condiciones algunas especies reducen o detienen su crecimiento durante la fase de inundación provocando la diferenciación del cambium y la formación de anillos anuales [15]. Es por ello que el ancho de los anillos dependería en gran medida de la duración de la época de estiaje [22].

En esta investigación tiene como objetivos determinar la frecuencia de formación de los anillos del cativo y reconstruir los niveles del Río a partir del ancho de los anillos de crecimiento; además, verificaremos si existe algún efecto del cambio climático en los niveles del Río. También exploraremos la relación entre los anillos y los índices SOI (*Southern Oscillation Index*) y ONI (*Oceanic Niño Index*) del ENSO así como el efecto de la precipitación pluvial en el crecimiento del cativo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en el bajo río Atrato, municipio de Riosucio, Chocó. En la estación cercana a Domingodó la temperatura media es 27°C y la precipitación media anual cercana a 4000 mm. El régimen de precipitación es levemente bimodal. El bajo río Atrato muestra pocas variaciones de nivel de mayo a diciembre, pero entre febrero y abril se presenta un marcado estiaje (Figura 1). Los niveles del Río se ven fuertemente afectados por el fenómeno ENSO. EL Niño ocasiona niveles más bajos que los niveles medios; mientras que La Niña produce efectos contrarios (Figura 1).

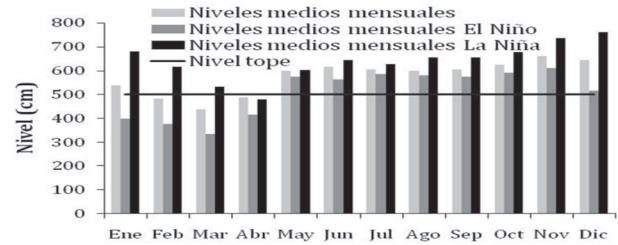


Figura 1. Patrón mensual de los niveles del bajo río Atrato (Estación Domingodó: 1979-2003). Las inundaciones en años normales duran 8 a 9 meses y durante los años La Niña hasta 11 meses.

2.2 Muestreo y preparación de las muestras

Colectamos 11 secciones transversales de *P. copaifera* cerca de la base de árboles cortados en 2007, aproximadamente en las coordenadas 7° 15'03,6"N y 76° 58'42,45"W. Las trasladamos al laboratorio de Bosques y Cambio Climático en Medellín donde las secamos bajo techo durante un mes. Luego las pulimos para resaltar los anillos con lijas cada vez más finas hasta grano 1000.

2.3 Anualidad de los anillos

Extrajimos unos 20 gr de madera a un anillo de tres secciones transversal los cuales enviamos para análisis de ^{14}C al *The Marzeev Institute of Hygiene and Medical Ecology* en Ucrania. Predatamos la fecha de formación de los anillos suponiendo que eran anuales. Calibramos los resultados empleando el *software* CALIBOMB [14].

2.4 Mediciones y análisis

Marcamos con lápiz dos radios por sección transversal (una sección tuvo 3 radios) desde el centro anatómico hasta la corteza a lo largo de los cuales marcamos los anillos bajo un estereozoom. Medimos perpendicularmente el ancho de los anillos con precisión de 0,001mm en una plataforma Velmex (*Velmex Inc. Bloomfield NY USA*) adosada a un computador y un estereozoom continuo (10X-45X) reticulado.

Crossdatamos visualmente (*cross-dating* en inglés) mediante gráficas de esqueleto, luego verificamos el crossdatado con el *software* COFECHA [13]. La datación permitió identificar el año calendario exacto en que se formó cada anillo así como detectar anomalías en el crecimiento.

Desarrollamos una cronología maestra del grosor de los anillos mediante el promedio de las series individuales [5]. Para estandarizar las series empleamos el programa ArStan (*Auto Regressive Standardization*), eliminamos la tendencia ontogénica con la función *spline* y la autocorrelación temporal de las series con modelos autoregresivos. Ensayamos diferentes longitudes del filtro *spline* cúbica, para estimar los valores de las series: 5, 10, 12, 15, 31 y 62 años de longitud conservando 50% de la varianza con el objeto de observar la flexibilidad de las diferentes *spline* y como afectaban la correlación de la serie de índices de anillos con las variables climáticas. Computamos el índice de anillos dividiendo los valores medidos entre los estimados por la función correspondiente obteniendo una serie estacionaria de índices de crecimiento. Calculamos la cronología promedio mediante la media robusta doblemente ponderada que minimiza el efecto de las observaciones extremas.

Empleamos los registros de niveles mensuales del bajo río Atrato de la estación Domingodó (07° 10' N; 77° 02' W), suministrados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), a unos 7 km de donde se tomaron las muestras. Los registros son continuos entre 1977 y 2000 (23 años). Como detectamos 11,8% de datos faltantes los estimamos aleatoriamente de los demás registros según correspondieran a años El Niño, La Niña o neutros [32]. Utilizamos los registros de precipitación de la estación Domingodó y los de temperatura de la estación Sautata (7° 71' N; 77° 07' W) suministrados también por el IDEAM. Les realizamos pruebas de homogeneidad y confiabilidad para verificar su calidad. Los valores de los índices del ENSO, SOI y ONI, los tomamos de NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, USA) en la dirección <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/> del *National Weather Service*.

Relacionamos las cronologías ArStan y residuales con las variables ambientales mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Las variables ambientales instrumentales fueron: niveles del río (máximos, mínimos y medios mensuales y anuales, estacionales septiembre-noviembre SON, diciembre-febrero DEF, marzo-mayo MAM y junio-agosto JJA), precipitación y temperatura media anual y semestral e índices del ENSO mensuales, trimestrales y anuales. Determinamos el inicio del año fenológico del cativo

mediante análisis de correlación entre la cronología Residual y los registros de los niveles promedios anuales con rezagos de a un mes.

Calculamos la función respuesta de la cronología en función de los niveles del río como regresiones lineales simples [10, 6]. Ajustamos regresiones múltiples entre la cronología residual y los índices SOI y ONI para determinar la relación entre el crecimiento del cativo y el ENSO.

2.5 Reconstrucción climática

Reconstruimos los niveles del bajo río Atrato con la función transferencia [10, 5], regresiones lineales entre los índices de los anillos y las alturas limnimétricas. En la calibración del modelo se hizo un análisis de componentes principales (CP) para eliminar la multicolinealidad entre las series climáticas [11]. Estimamos la función transferencia, con los CP de los Niveles en función de los índices de los anillos, con la cual estimamos los valores de Niveles CP para el período de tiempo de la cronología. Estimamos nuevas regresiones lineales ajustadas para los niveles máximos, promedios y los niveles del trimestre SON en función de Niveles CP estimados [11, 6].

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización y anualidad de los anillos

Las tres muestras de anillos analizadas con radiocarbono arrojaron probabilidades de anualidad de 93%, 94% y 96%. Esta es una prueba muy convincente de la anualidad de los anillos del cativo.

Los anillos de crecimiento del cativo se distinguen a simple vista. Se caracterizan por un patrón continuo de fibras, abundante tejido parenquimático rodeando los poros y, en ocasiones, bandas discontinuas de parénquima a lo largo del anillo. Están limitados por una banda de parénquima marginal continua a través de toda la circunferencia de la sección transversal.

El árbol más longevo de la muestra tuvo 161 años. La edad promedio de los árboles fue 116 años. Los árboles más longevos muestran la clásica tendencia ontogénica durante su lapso vital. El ancho promedio de los anillos fue de $2,5\text{mm} \pm 1,57\text{mm}$.

3.2 Cofechado, estandarizado y selección de la cronología

La correlación entre árboles ($r=0,476$; $p<0,05$) arrojada por COFECHA fue significativa y superior a $r = 0,337$ ($p<0,05$). La sincronía entre las series individuales demuestra la existencia de una señal ambiental común que, como las inundaciones anuales, afecta simultáneamente a todos los árboles de la región.

Dependiendo de la flexibilidad de las funciones *spline* utilizadas, se generaron diversas cronologías maestras con diferentes relaciones con los niveles del río (Tabla 1). La cronología residual (Cro6R) alcanzó la más alta correlación entre las series ($r = 0,394$) y relación señal ruido (RSR=11,033). Las cronologías residuales (CroR) casi siempre alcanzaron mejores ajustes con los niveles del Río que las cronologías ArStan (CroA). Aunque las cronologías con *spline* mas flexibles casi siempre tuvieron los mejores estadísticos, la Cro4R ajustó mejor con los niveles del Río ($r = 0,543$, $p<0,05$) (Tabla 1) por lo cual se adoptó para la reconstrucción (Figura 2).

3.3 Análisis hidroclimático

La cronología Cro4R correlacionó significativa y positivamente con los niveles máximos (0,589; $p<0,01$) y del trimestre SON ($r=0,548$; $p<0,01$) (Tabla 2). La correlación de Cro4R con los niveles mensuales del Río fue significativa para abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre del año corriente (Figura 3). La Cro4R correlacionó negativamente aunque no significativamente con la temperatura (Tabla 2). La única cronología que correlacionó significativamente con la precipitación fue la cronología Cro4A ($r = 0,419$; $p<0,05$), la Cro4R correlacionó positivamente pero no significativamente.

Encontramos correlaciones negativas y significativas entre los valores del índice ONI, durante el período instrumental (1950-2007, NOAA) en los trimestres del año desde de AMJ hasta NDE, con la Cro4R. La correlación más alta se alcanzó en este último trimestre ($r=-0,371$, $p<0,01$). Una situación similar encontramos en las correlaciones con el índice SOI, pero siempre positivas. La correlación más alta también fue en NDE ($r=-0,371$, $p<0,01$) (Figura 4). Las correlaciones son opuestas debido a la forma como se calculan los dos índices: cuando las diferencias de presión atmosférica entre Darwing, Australia, y la isla Tahití aumentan (cambios de SOI con tendencia positiva), las diferencias de temperatura superficial del mar entre estos dos puntos se reducen (cambios de ONI con tendencia negativa). Esto se evidencia en la respuesta opuesta al SOI y al ONI del trimestre NDE en el crecimiento del cativo (Figura 4).

Tabla 2. Coeficiente de correlación de Pearson (r) entre la Cronología Cro4R y algunas variables hidroclimáticas locales.

Variables hidroclimáticas	r Cro4R	F (Fisher) Cro4R
Niveles medios	0,543**	9,2150
Niveles mínimos	0,310	2,3400
Niveles máximos	0,589**	11,672
Niveles SON	0,548**	9,4270
Niveles DEF	0,441*	5,3050
Niveles MAM	0,461*	5,9430
Niveles JJA	0,388	3,8920
Temperatura promedio anual	-0,379	4,5335
Temperatura primer semestre	-0,410	4,4749

Tabla 1. Estadísticos de las diferentes cronologías ajustadas mediante el programa ARSTAN: cronologías residuales (CroR) y cronologías ArStan (CroA). SM, sensibilidad media; DE, desviación estándar; Ar (1), autocorrelación de orden 1; RSR, relación señal-ruido; r_a , correlación entre los árboles de la serie; r_n , correlación con los niveles del Río.

Cronología	Longitud <i>Spline</i>	SM	DE	Ar (1)	r_a	RSR	r_n
Cro1R	61 años	0,321	0,271	-0,015	0,253	5,752	—
Cro1A	61 años	0,352	0,285	-0,119			
Cro2R	31 años	0,298	0,251	-0,009	0,280	6,602	—
Cro2A	31 años	0,340	0,266	-0,201			
Cro3R	15 años	0,238	0,198	-0,037	0,303	7,386	0,534
Cro3A	15 años	0,329	0,254	-0,242			0,423
Cro4R	12 años	0,213	0,179	-0,039	0,320	7,984	0,543
Cro4A	12 años	0,328	0,248	-0,338			0,441
Cro5R	10 años	0,196	0,163	-0,070	0,335	8,581	0,507
Cro5A	10 años	0,327	0,246	-0,365			0,409
Cro6R	5 años	0,129	0,111	-0,015	0,394	11,033	0,258
Cro6A	5 años	0,288	0,199	-0,557			0,398

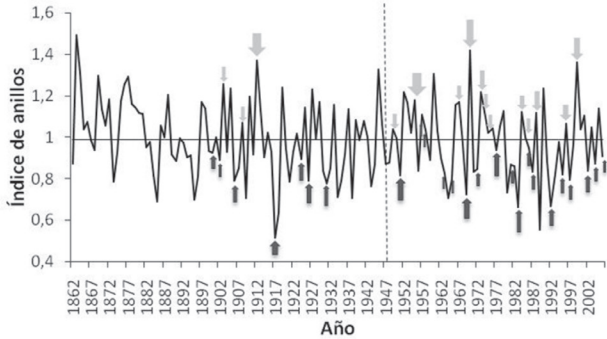


Figura 2. Cronología Cro4R y los años ENSO reflejados en los anillos de crecimiento del cativo. Los registros de años El Niño ↑ y La Niña ↓ anteriores a 1952 se obtuvieron de la Organización Mundial de la Salud [18]. El ancho de las flechas corresponde aproximadamente al rigor del fenómeno.

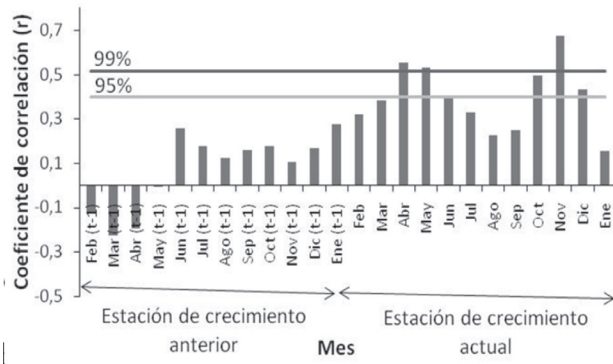


Figura 3. Correlaciones (r) entre la cronología Cro4R y los niveles mensuales del río Atrato para el año corriente y el año anterior. Las líneas horizontales indican confiabilidad del 95% y 99%, respectivamente.

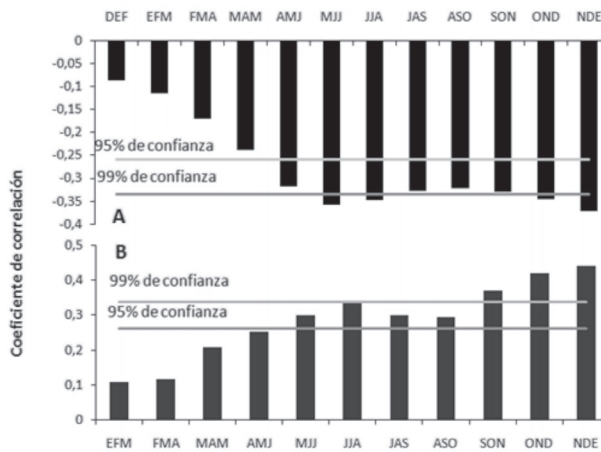


Figura 4. Correlaciones (r) entre la cronología Cro4R e índices trimestrales del ENSO. A) con ONI y B) SOI.

3.4 Reconstrucción climática

La función transferencia (1) resultó de una regresión lineal simple entre los componentes principales de los niveles (Niveles CP) (Y_t) y el índice de los anillos (X_t). Presentó una correlación positiva y significativa entre los datos climáticos y los índices de anillos ($r=0,566$; $p<0,01$). Con esta función estimamos los Niveles CP hasta 1861, año hasta el que se extendió la cronología. Las regresiones lineales ajustadas arrojaron coeficientes de correlación muy altos con los Niveles CP estimados permitiendo llevar estos índices a valores de niveles del río máximos, medios y del trimestre SON (Tabla 3).

$$Y_t = - 49,690 + 0,053(X_t) \quad (1)$$

En la Figura 5 presentamos las reconstrucciones de los niveles máximos y del trimestre SON del río Atrato junto con las ecuaciones que muestran la tendencia de los niveles en el tiempo. En todos los casos la pendiente de las funciones de los niveles fue negativa durante todo el período reconstruido aunque no significativa con confiabilidad mayor o igual al 95% (pendiente con $p>0.05$).

La media móvil de 10 años presenta crestas y valles ligeramente marcados insinuando la existencia de ciclos con periodicidad cercana a los cinco años. Igualmente este filtro detecta largos lapsos de variación cuya duración tiende a reducirse: 1868-1901 (67 años) reducción constante de los niveles máximos, 1901-1938 (37 años) caudales relativamente estables, 1938-1961 (23 años) aumento constante de los niveles máximos, 1979-1997 (18 años) los niveles máximos del río tienden a disminuir y desde 1997 los niveles máximos están aumentando (Figura 5).

Tabla 3. Modelos de transferencia ajustados ($Y_t = b_0 + b_1 X_t$) de los niveles del río (Y_t) y los Niveles de CP estimados con la ecuación de transferencia (1) (X_t)

variable	modelo		r^2	p
	b_0	b_1		
Niveles medios	574,832	3,758	0,935	0,000
niveles máximos	696,917	4,187	0,832	0,000
Niveles SON	625,319	3,507	0,881	0,000

La fidelidad de la reconstrucción se valida por las siguientes razones: i) Existe correlación significativa ($r=0,317$) entre la reconstrucción y el índice SOI durante los 55 años de registros instrumentales. Además, existe correlación significativa ($r=0,718$ y $r=-0,563$) entre los niveles de SON y los índices SOI y ONI respectivamente. ii) Existe alta coincidencia entre los altos niveles en la reconstrucción y los registros de grandes desastres por inundaciones desde 1958 (Inventario Histórico de Desastres”, disponible en el sitio <http://online.desinventar.org>).

4. DISCUSIÓN

La existencia de anillos anuales en árboles tropicales ha sido ampliamente demostrada [22]. Mckenzie en 1972 [17] probó la existencia de anillos anuales en cativo mediante la técnica de marcación del cambium. Los resultados de nuestra investigación confirman que el cativo tiene anillos anuales. La datación con radiocarbono, la correcta datación y las correlaciones significativas con variables hidroclimáticas anuales (Tablas 2 y Figura 3) son todas evidencias de la anualidad de los anillos del cativo.

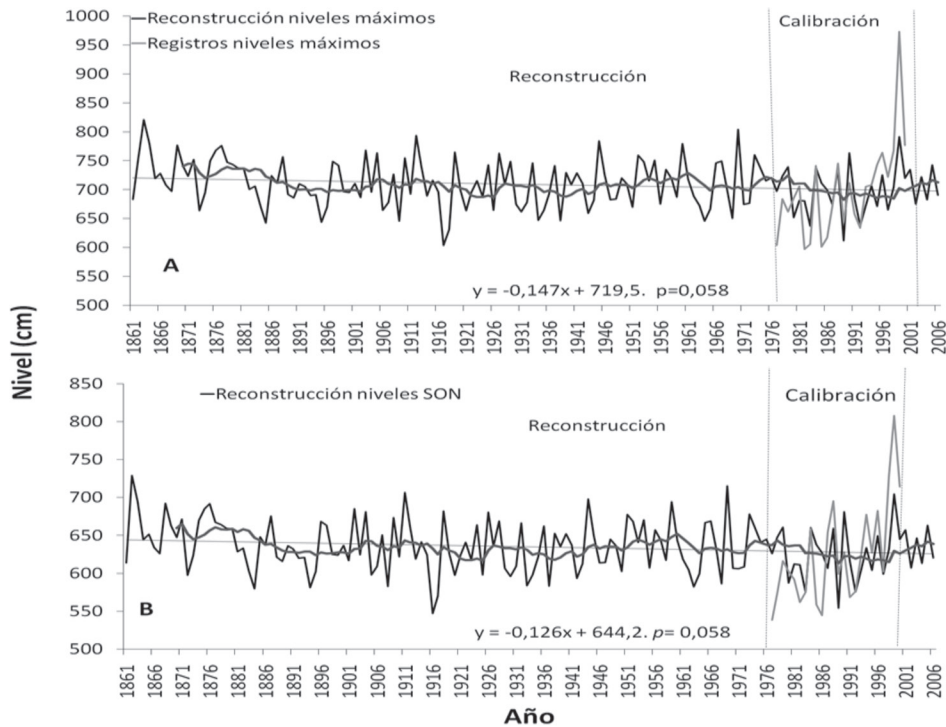


Figura 5. Periodos de calibración y reconstrucción de los niveles del río Atrato con la cronología Cro4R A) Niveles máximos, B) Niveles SON. La línea gris oscura corresponde a la media móvil de 10 años.

Encontramos numerosas anomalías en el crecimiento del cativo: anillos falsos, faltantes, múltiples y microanillos que hacen del crossdatado una laboriosa tarea. El coeficiente de correlación más bajo alcanzado entre las series individuales y la serie promedio ($r=0,337$) superó el límite de significancia sugerido por COFECHA ($r>0,320$). Aunque los valores de correlación parecen bajos, debe tenerse en cuenta que no existe una cronología maestra de referencia altamente depurada para esta zona. Por ello las series individuales deben compararse con una cronología media que contiene más ruido que las cronologías maestras regionales [25]. Como dispusimos de

secciones transversales completas y sabíamos la fecha de corta de los árboles, pudimos hacer seguimiento a través de toda la sección a los anillos con anomalías, como lo recomiendan para el trópico Rozendaal y Zuidema [22]. Detectamos la mayoría de las anomalías en los anillos externos de los árboles más viejos donde las tasas de crecimiento son muy bajas.

El carácter estacional de los niveles del río Atrato se debe a la anualidad del chorro del Choco y de la ZCIT que producen inundaciones anuales seguidas de marcados estiajes, a los cuales se adicionan los efectos del ENSO

[21]. Esto, hipotéticamente, induce la formación de anillos anuales en cativo. Situaciones similares se han reportado en la Amazonia [23] y en el delta del río Orinoco [8]. Las especies tropicales que crecen en estos medios tienen un alto potencial dendrocronológico para reconstruir espacial y temporalmente con resolución anual la hidroclimatología de regiones tropicales con déficit de información instrumental [23]. Ello permite comprender mejor la variabilidad climática y aporta información muy valiosa sobre el efecto del cambio global en los ecosistemas terrestres tropicales [4].

Los coeficientes de correlación alcanzados en las funciones respuesta fueron altos respecto a los reportados en el trópico y aun fuera del trópico [26]. Existe fuerte correlación positiva entre el índice SOI y los caudales mensuales de 50 ríos Colombianos en los cuales las correlaciones fueron máximas para SON [21]. Nosotros también encontramos que el crecimiento del cativo correlaciona positiva y significativamente con el índice SOI y negativamente con el índice ONI del ENSO (Figura 4). Las correlaciones más fuertes las encontramos para el trimestre NDE que coincide con el período de mayores niveles del Río, lo cual evidencia una clara relación entre el nivel del río Atrato y la ocurrencia del ENSO.

Respecto a las tendencias del Río, solo si aceptamos confiabilidad de apenas 90%, podríamos afirmar que los niveles han disminuido durante los últimos 150 años (Figura 2). Encontramos coherente este resultado con la reducción de los caudales de las principales cuencas de Colombia (unos $4\text{m}^3/\text{s}/\text{año}$ en promedio) reportado por Poveda [21] a partir de registros instrumentales. Las oscilaciones que muestran los niveles máximos cuando se aplica la media móvil de diez años podrían estar relacionadas con el ENSO, los efectos de El Niño cálido y seco y La Niña, fresca y lluviosa (Figura 5). ENSO es un fenómeno irregular que se alterna entre sus dos fases aproximadamente cada 4 ± 2 años [12], por tanto, cinco años está muy cerca de su tiempo medio de retorno.

Los índices de anillos de crecimiento más anchos los encontramos en los años 1971, 1984, 1999 coincidiendo con años La Niña durante el período de registros instrumentales (NOAA 2010) (Figura 2). Los eventos El Niño los para los años 1915, 1918, 1926, 1931 según la organización Mundial de la Salud [18], 1957, 1965,

1969-1970, 1972, 1977-1983, 1986-1987, 1991-1995, 1997-1998 y 2002-2006 (NOAA 2010) se encuentran fielmente en la cronología del cativo. Se nota que cativo registra mayor cantidad de eventos El Niño (Figura 2), debido a que el crecimiento de los árboles registra más fielmente los eventos climáticos limitantes del crecimiento [11], que para el caso del cativo son los niveles bajos asociados con El Niño.

La reconstrucción muestra los niveles más altos en los últimos 146 años de historia del río Atrato (Figura 5). El análisis de daños y tipo de eventos lo hicimos con la base de datos “Colombia: Inventario Histórico de Desastres”, disponible en el sitio <http://online.desinventar.org>. La mayor cantidad de desastres reportados por inundación fue para los períodos 1970-1971 y 1999-2000, que en la reconstrucción, presentan los mayores niveles del río Atrato, en el período cubierto por el Inventario Histórico de Desastres (1958-2006). En la reconstrucción se observa un incremento en la frecuencia de altos niveles durante los últimos 146 años: 1862-1863, 1912-1913, 1945-1946, 1960-1961, 1970-1971, 1990-1991 y 1999-2000 (Figura 5). Observamos que entre los tres primeros períodos de niveles altos hay lapsos de 50, 33 y 15 años. Desde 1960 la frecuencia de estos eventos ha sido generalmente de 10 años incluyendo el período 2010-2011 que aunque no está cubierto por la cronología en él se ha registrado un prolongado período lluvioso acompañado de inundaciones sin precedentes. Este aumento en la frecuencia de inundaciones asociado, por lo regular, con eventos La Niña (Figura 2) posiblemente tenga relación con el cambio climático [9].

En estudios realizados con diversas especies de árboles de bosques inundables tanto de *vársea* (inundados por aguas blancas) como de *igapó* (inundados por aguas negras) de la Amazonia se encontraron correlaciones positivas y significativas con los períodos de estiaje y significativamente negativas con los niveles máximos del Río [26, 24, 8]. Es decir, que los árboles detienen o reducen significativamente su crecimiento durante la fase de inundación y crecen aceleradamente durante el estiaje. Lo opuesto encontramos en este estudio: el cativo responde positiva y significativamente a los niveles más altos de río Atrato, en especial durante los años La Niña. Es lógico que durante las fases de inundación los árboles, al encontrarse bajo condiciones hipóxicas y aun anóxicas, deban reducir o detener

su crecimiento como mecanismo de sobrevivencia y adaptación a condiciones tan desfavorables [15]. Por esto establecimos la hipótesis según la cual el cativo reducía su crecimiento durante los períodos de inundación, que resultó rechazada por cuanto en cativo ocurre lo contrario. Este hallazgo hace aun más interesante la investigación pues hemos descubierto un rasgo desconocido de esta especie y poco frecuente en la naturaleza que requiere de cuidadosa investigación ecofisiológica.

Hemos encontrado pocos estudios dendrocronológicos en los cuales los árboles muestren tasas de crecimiento positivas asociadas con las fases inundación [1]. En la Amazonia brasileña *Nectandra amazonum* y *Tabebuia barbata* [24, 19], y en la Mata Atlántica, Brasil, *Tabebuia umbellata* [3]. Igualmente, en zonas templadas *Taxodium distichum*, que crece en bosques permanentemente inundados con aguas someras, exhibe correlación positiva con el máximo de precipitación en el delta del río Misisipi, más no con los niveles de la lámina de agua [2].

Existen diferencias considerables en cuanto a la lámina de inundación entre los cativales del río Atrato y los bosques inundables de la Amazonia y el Orinoco. Mientras durante las mayores inundaciones acaecidas en los años La Niña en los cativales del río Atrato la lámina de agua escasamente alcanza 2m (Figura 1), en la Amazonia esta supera los 6m [23]. *T. umbellata* y *T. distichum* también crecen como el cativo, en bosques inundados por aguas someras [3, 2]. Donde crece *T. distichum* las lluvias aportan oxígeno, el cual reduce las condiciones hipóxicas del sistema radical. Por tanto, el aumento en el espesor de la lámina de agua si tiene influencia en el crecimiento, ya que la oxigenación de las raíces que permite que estas respiren y los árboles crezcan, lo cual evidenció correlación positiva con las lluvias [2]. En el cativo, sin embargo, la correlación de la cronología Cro4R con las precipitaciones no fue significativa al menos para las precipitaciones de la parte baja.

Las sorprendentes adaptaciones de algunos árboles a las condiciones pulsantes de estiaje-inundación han develado la existencia de especies que pueden mantenerse fotosintéticamente activas tanto durante las fases secas como de inundación, aun en condiciones anóxicas [15]. Algunas adaptaciones descritas son: alto

porcentaje de tejido parenquimático [24]; aerénquima en las raíces y corteza [16]; follaje esclerófilo [15]; y una ruta de metabolismo alternativo [7]. Así, la actividad fotosintética puede inclusive superar la del estiaje [7, 1]. Muchas de las adaptaciones previamente mencionadas pueden explicar porqué algunos árboles, e inclusive el cativo, crecen durante la fase hídrica, mas no porqué el cativo crece significativamente menos durante el estiaje habida cuenta de la abundante pluviosidad de la zona y la cercanía de las aguas freáticas en estas planicies de inundación que, supuestamente, descartarían el déficit hídrico como limitante para el crecimiento.

7. CONCLUSIONES

Los resultados permiten concluir que: cativo es una especie tropical con anillos anuales. El crecimiento del cativo se relacionó positivamente con la fluctuación de los niveles del río Atrato, lo cual pone de presente el efecto positivo que tienen los altos niveles del Río sobre el crecimiento de esta especie. El cativo responde significativamente a los eventos ENSO, creciendo más aceleradamente durante La Niña y menos durante El Niño.

Los anillos de cativo permitieron reconstruir los niveles del Río durante los últimos 146 años (1861-2006). La reconstrucción registra las peores inundaciones acaecidas en la zona durante el período reconstruido.

AGRADECIMIENTOS

Los autores dejamos constancia de agradecimiento: al programa Expedición Antioquia 2013 de la gobernación de Antioquia por la financiación del proyecto “Reconstrucción del clima en la cuenca del río Atrato (Antioquia-Chocó) mediante técnicas dendrocronológicas”, a la Dirección de Investigación de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín-DIME- por la financiación del proyecto 20201007165, al Laboratorio de Bosques y Cambio Climático de la Facultad de Ciencias Agropecuarias por el uso de su infraestructura y equipos. Un agradecimiento muy especial para el señor Alfredo Moreno por su colaboración en la toma de las muestras. También agradecemos las sugerencias de dos árbitros anónimos las cuales mejoraron nuestro escrito.

8. REFERENCIAS

- [1] Armbrüster, N., Müller, E. and Parolin, P., Contrasting responses of two Amazonian floodplain trees to hydrological changes. *Ecotropica* 10: pp. 73-24. 2004.
- [2] Blake, J., Dendrochronological analysis of productivity and hydrology in two Louisiana swamps [M. Sc. Tesis], Louisiana State University. 2006.
- [3] Callado, C.H., Da Silva, S.J., Scarano, F.R. and Costa, C.G., Radial growth dynamics of *Tabebuia umbellata* (Bignoniaceae), a flood-tolerant tree from the Atlantic forest swamps in Brazil. *IAWA Journal* 25: pp. 175-183. 2004.
- [4] Case, R.A. and Macdonald, G.M., Tree ring reconstruction of streamflow for three Canadian prairie rivers. *Journal of the American Water Resources Association* 39: pp. 703-716. 2003.
- [5] Cook, E.R. and Kairiukstis, L.A., *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 1990.
- [6] Davi, N.K., Jacoby, G.C., Curtis, A.E. and Baatarbeleg, N., Extension of drought records for central Asia using tree rings in West-central Mongolia. *Journal of Climate* 19: pp. 288-299. 2006.
- [7] De Simone, O., Junk, W.J. and Schmidt, W., Central Amazon floodplain forests: Root adaptations to prolonged flooding. *Russian Journal of Plant Physiology* 50: pp. 848-855. 2003.
- [8] Dezzeo, N., Worbes, M., Ishii, I. and Herrera, R., Annual tree rings revealed by radiocarbon dating in seasonally flooded forest of the Mapipe River, a tributary of the lower Orinoco River, Venezuela. *Plant Ecology* 168: pp. 165-175. 2003.
- [9] Fichtler, E., Trouet, V., Beeckman, H., Coppin, P. and Worbes, M. Climatic signals in tree rings of *Burkea africana* and *Pterocarpus angolensis* from semiarid forests in Namibia. *Trees* 18: pp. 442-451. 2004.
- [10] Fritts, H.C. *Tree ring and climate*. Academic Press. London. 1976.
- [11] Fritts, H.C. *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-ring data: a diagnostic analysis*. The University of Arizona Press. Tucson. 1991.
- [12] Gergis, J.L. and Fowler, A.M., A history of ENSO event since A.D. 1525: Implication for future climate change. *Climate Change* 92: pp. 343-387. 2009.
- [13] Grissino-Meyer, H.D., Evaluation crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA. *Tree-Ring Research* 57: pp. 205-221. 2001.
- [14] Hua, Q. and Barbetti, M., Review of tropospheric bomb ¹⁴C data for carbon cycle modeling and age calibration purposes. *Radiocarbon* 46: pp. 1273-1298. 2004.
- [15] Junk, W. J., Piedade, M. T. F., Wittmann, F., Schöngart, J. and Parolin, P., *Amazonian flood plain forest: Ecophysiology, biodiversity and sustainable management*. SpringerVerlag. Berlin. 2010.
- [16] López, O.R., Fisiología y ecología de comunidades arbóreas en hábitats inundables. *Acta Biológica Panamensis* 1: pp. 68-86. 2009.
- [17] Mckenzie, T.A., Observations on growth and a technique for estimating annual growth in *Prioria copaifera*. *Turrialba* 22: pp. 352-354. 1972.
- [18] Organización Mundial de la Salud, Subcomité de Planificación y Programación del Comité Ejecutivo. *Cambio climático y enfermedades infecciosas: consecuencias del fenómeno El Niño*. SPP30/5 (Esp.). Organización Mundial de la Salud, 1998.
- [19] Parolin P. and Wittmann, F., Struggle in the flood: Tree responses to flooding stress in four tropical floodplain systems. *AoB PLANTS*: plq 003, doi: 10.1093/aobpla/plq003. 2010.
- [20] Poveda, G. y Mesa, O. J., La corriente del chorro superficial del oeste, "Chorro del Chochó" y otras dos corrientes de Chorro en Colombia: climatología y variabilidad durante las fases del ENSO. *Revista Academia Colombiana de Ciencias* 23: pp. 517-528. 1999.
- [21] Poveda, G., Gil, M.M. y Quiceno, N., El ciclo anual de la hidroclimatología de Colombia en relación con el ENSO y la NAO. *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines* 27: pp. 727-731. 1998.
- [22] Rozendaal, D.M. and Zuidema, P.A., Dendroecology in the tropics: a review. *Trees* 25: pp. 3-16. 2011.
- [23] Schöngart, J., Junk, W.J., Piedade, M.T.F., Ayres, J.M., Hüttermann, A. and Worbes, M., Teleconnections between tree growth in the Amazonian floodplains and the El Niño-Southern Oscillation effect. *Global Change Biology* 10: pp. 683-692. 2004.

- [24] Schöngart, J., Piedade, M.T.F., Wittmann, F., Junk, W.J. and Worbes, M., Wood growth patterns of *Macrobium acaciifolium* (Benth.) Benth. (Fabaceae) in Amazonian black-water and white-water floodplain forests. *Oecologia* 145: pp. 454-461. 2005.
- [25] Trouet, V., Esper, J. and Beeckaman, H., Climate/growth relationships of *Brachystegia spiciformis* from the miombo woodland in south central Africa. *DendroChronologia* 28: pp. 167-171. 2010.
- [26] Worbes, M., Annual growth rings, rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *Journal of Ecology* 87: pp. 391-403. 1999.