



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios  
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-064

---

---

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales  
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017  
**ISBN 978-84-941695-2-6**

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Variaciones siderales y del clima en Colombia: Registro en anillos de crecimiento

GIRALDO, J.<sup>1</sup> DEL VALLE, J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Estudiante del doctorado en Ecología, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. [jagiral1@unal.edu.co](mailto:jagiral1@unal.edu.co)

<sup>2</sup> Profesor, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. [jdvalle@unal.edu.co](mailto:jdvalle@unal.edu.co)

### Resumen

El sol es la principal fuente de energía en la tierra. Las variaciones de la radiación solar afectan tanto el clima como la fotosíntesis de las plantas. Existen pocos estudios que evalúan la capacidad de los árboles para registrar la variabilidad solar, y sólo dos estudios previos se han llevado a cabo el trópico. Usando técnicas dendrocronológicas estándar, se construyó una cronología del índice de ancho de anillos (IA) del árbol tropical *Cariniana pyriformis* (Chocó, Colombia), la cual fue relacionada mediante onditas, espectro cruzado y coherencia de onditas con el Índice de la Oscilación del Sur (SOI) y con las variables astronómicas: índice de manchas solares (IS) y flujo de rayos cósmicos galácticos (RCG). Las bandas de períodos de 2-4, 4-8 y de 8-16 años aparecen esporádicamente en el espectro cruzado y en el análisis de coherencia entre IA y SOI. El análisis del espectro cruzado y coherencia entre IA y SI, así como IA y RCG fueron significativas en la banda de periodicidad de 8-16 años. Nuestros resultados proporcionan nuevas evidencias de la capacidad de los árboles tropicales para registrar señales globales y astronómicas, de baja y media frecuencia.

### Palabras clave

Rayos cósmicos, variabilidad solar, SOI, árbol tropical, análisis de onditas.

### 1. Introducción

Sin la radiación solar la vida en la tierra cesaría. Incluso muchos cambios medio ambientales y de evolución ocurren gracias a la variabilidad solar (Karam, 2003). La actividad solar (AS) es la responsable de modular los rayos cósmicos galácticos (RCG), los cuales ionizan la atmósfera terrestre y producen el <sup>14</sup>C atmosférico (Oeschger et al., 1987). Cuando el sol es menos activo, la cantidad de GCR que ionizan la atmósfera terrestre es alta, y baja cuando el sol es más activo. Al mismo tiempo la ionización producida por los GCR favorece la formación de nubes bajas (Marsh & Svensmark, 2000), otros han verificado dicha hipótesis mediante observaciones de campo (Kniveton, 2004; Todd & Kniveton, 2004; Harrison & Stepheson, 2006; Svensmark et al., 2009) y en laboratorio (Svensmark et al., 2007; Enghoff, 2011).

La AS afecta el clima debido a la variabilidad de baja frecuencia que tiene lugar cada 11, 22 y 30-33 años (ciclo de Brückner), entre otros ciclos secundarios (Lean et al., 1995; Raspopov et al., 2004; Kasatkina et al., 2007). Las manchas solares son un registro directo de la AS: cuanto mayor sea la cantidad de manchas solares, mayor será la cantidad de radiación generada por el sol (Usoskin et al., 2003). El término irradiación solar total (IST) es usado para determinar la energía (medida en  $\text{wm}^{-2}$ ) que ingresa en la tierra (Rozelot & Lefebvre, 2006). No obstante, dicha radiación no es constante como lo demuestran los registros de satélites radiométricos, variando en 0.19% durante el ciclo de 11 años de AS (Lean et al., 1995; Solanki & Fligge, 1999). Tal variación pareciera pequeña, pero tal energía es suficiente para derivar en algunas modificaciones del clima, debido a los mecanismos amplificación en la atmósfera (National Research Council, 2012).

Determinar cómo las variables astronómicas afectan el clima es importante debido a que este determina la distribución del agua continental, la distribución de las plantas y animales y el hombre. Además, la fotosíntesis depende de la variabilidad de la luz solar, de la disponibilidad del agua y de las fluctuaciones de temperatura por lo que los cambios en dichas variables pueden ser registrados en los anillos de crecimiento de los árboles (Fritts, 1976). Los Anillos de crecimiento son la herramienta paleoclimática más importante de las últimas décadas (Hughes, 2002). La mayoría de reconstrucciones de temperatura en la superficie terrestre han sido realizadas empleando anillos de crecimiento y han permitido conocer la variabilidad de la temperatura durante los últimos 1000 años (Scudieri 1993, Esper et al., 2002, Marcott et al., 2013). Muchos registros paleoclimáticos sugieren un vínculo entre la AS y el clima de la tierra (Raspopov et al., 2000, 2004, Roig, 2001, Rind, 2002). El astrónomo Andrew E. Douglass, pionero en la investigación con anillos de crecimiento fue el primero en encontrar las conexiones entre las manchas solares y el clima a través de los anillos de crecimiento (Fritts, 1976), encontró periodicidades asociadas con el ciclo solar de 11 años en la serie de anillos (Douglas, 1933). A pesar de ello, los estudios sobre AS y anillos de crecimiento son escasos en las regiones templadas y frías (Murphy, 1990, 1991; Rigozo et al., 2004; Noderman et al., 2005; Prestes et al., 2011; Wang & Zhang, 2011). En la región tropical solo dos estudios han sido llevado a cabo, uno de ellos por Rigozo et al., (2012), el cual incluye dos especies de árboles subtropicales y una especie de árbol tropical (*Parkia* sp) de la Amazonía, y un estudio realizado por Giraldo (2012), el cual fue llevado a cabo en la Cordillera central de los Andes de Colombia, en ambos estudios se encontraron relaciones significativas entre las series de variables astronómicas y las series de anillos de crecimiento.

Las especies del género *Cariniana* son muy conocidas por su alto valor comercial en los bosques tropicales y subtropicales de América. Más aún, existen indicios de que podrían ser los árboles más longevos de América tropical. En la Amazonía, Chambers et al., (1988) empleando únicamente técnicas de radiocarbono, aduce que *C. micranta* puede alcanzar edades de 1400 años. Worbes & Junk (1999) empleando tanto radiocarbono como anillos encuentran edades de alrededor de 500 años para *C. legalis*. Lisi et al. (2008) describen las características anatómicas de los anillos de crecimiento en *C. legalis* y en *C. estrellensis*, y demuestran la formación de anillos anuales en ambas especies. Otra especie del género estudiada es *C. pyriformis*, la cual forma anillos de crecimiento anuales, visibles a simple vista y sensibles a la precipitación (Moreno & del Valle 2015).

## 2. Objetivos

En este estudio sometemos a prueba la hipótesis de que los anillos de crecimiento de *C. pyriformis* del pacífico colombiano, registran a la variabilidad ambiental de baja frecuencia como el la actividad solar y la radiación cósmica galáctica y de media frecuencia, el SOI (*Southern Oscillation Index*).

## 3. Metodología

El muestreo se llevó a cabo en la serranía del baudó (Cordillera occidental de los Andes), departamento del Chocó. El área pertenece al municipio del Carmen del Darien, ubicado entre las coordenadas 6°52' 6" N - 6°23'27"N y 77°10'27"W - 77°12'3"W (Figura 1); donde se muestrearon 13 árboles *C. pyriformis* talados por los grupos étnicos locales, quienes cuentan con permisos para dichos aprovechamientos. La precipitación promedio de la estación más cercana es 3500 mm/año (no obstante el área de estudio se encuentra en la isoyeta de 4000 mm), clasificado como Bosque muy húmedo tropical (*sensu* Holdrige 1967). Los meses menos lluviosos ocurren de enero a marzo con una media de 137 a 173 mm respectivamente, el período más lluvioso ocurre de abril a diciembre, con precipitaciones mensuales en promedio de 260 mm. La temperatura media anual es 26.1 °C. La temperatura más baja ocurre de octubre a noviembre (25.1 °C) y la más alta en abril (26.6 °C).

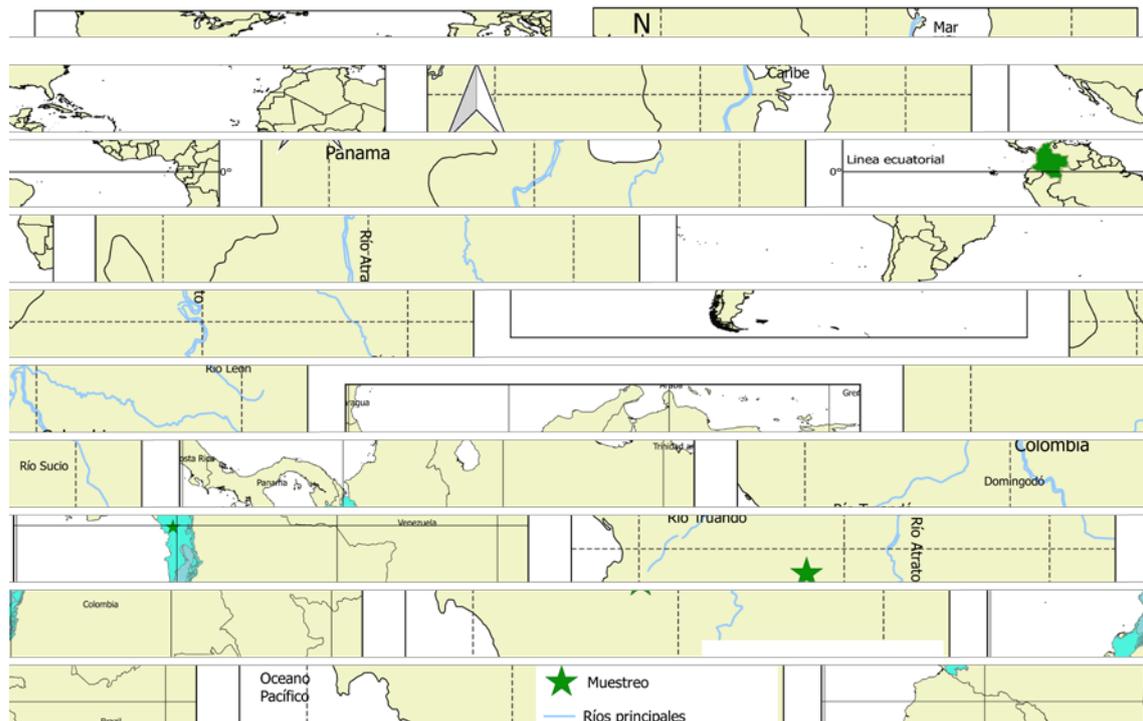


Figura 1. Área de estudio. Las capas de información fueron extraídas del SIGOT-Colombia (<http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/>)

Debido al tamaño de las secciones transversales las cuales variaron entre 83cm y 192cm en diámetro, eran demasiado pesadas (Mas de 40kg) para usar el equipo Velmex, usamos un método alternativo: se tomaron imágenes digitales de 15 megapíxeles con una cámara profesional (Canon EOS 50D), ubicada sobre un trípode a 43 cm de distancia de cada sección transversal. Una regla milimétrica fue ubicada en cada una de las secciones transversales para determinar posteriormente la equivalencia de píxeles de la imagen en milímetros. Se tomaron muchas fotografías solapadas por muestra, en las que se midió solo la parte central para evitar las distorsiones al medir el ancho de anillos en la periferia de la imagen. Los anillos de crecimiento fueron medidos con una precisión 0.07 mm mediante el software Image-J (Ferreira & Rasband, 2011; Abramoff et al., 2004). Para la construcción de la cronología maestra o índice de anillos (IA), usamos 32 series obtenidas de 13 secciones transversales de *C. pyriformis*, previamente, Moreno & del Valle (2015) demostraron que *C. pyriformis* forma anillos de crecimiento anuales en la misma región de este estudio. La máxima edad registrada fue 181 años. Se empleó el paquete dplR (Bunn, 2008) del software R 3.3.0 software (R Core Team, 2015), usamos el método de estandarización automática con una spline suavizadora de 11 años, dejando así el 50% de la variabilidad de la amplitud de señal. Dicho procedimiento elimina la variabilidad ontogénica o ruido asociado a la edad. Se estimó la cronología maestra de los árboles muestreados empleando una media robusta ponderada y pre-blanqueo de las series para eliminar la auto-correlación serial. En algunos casos, cuando la autocorrelación persistió, se aplicó una medida correctiva sugerida por Fritts (1991):  $C_t = \frac{c_t - \tau(c_t - 1 - m)}{1 - \tau}$ , donde  $\tau$  es la auto-correlación de orden 1,  $C_t$  es el índice de la cronología para el año  $t$ , y  $m$  es la media de todos las series índice.

Se emplearon los datos anuales de la oscilación del Sur (*Southern Oscillation Index*), SOI, entre 1866 y 2009, (disponibles en *Earth System Research Laboratory*: (<http://www.esrl.noaa.gov>). Respecto a las variables astronómicas, usamos dos series: El índice de manchas solares (IS) (1840-2009, n=169) y el índice de RCG, reportado por el observatorio de Climax, USA (1953-2005, n=52) (39°37'00"N-253°82'00"E). Dicha información se encuentra disponible en el sitio de la NGDC (National Geophysical Data Center, Boulder, Colorado, <http://www.ngdc.noaa.gov/>).

Los análisis de onditas se realizaron con el paquete biwavelet (Gouhier & Grinsted, 2012) del software R 3.3.0 (R Core Team, 2015), se aplicó la transformada de onditas usando el método de Morlet a las series IA, SOI, IS, y a los RCG. Dicho método permite identificar variaciones en la amplitud de la señal (potencia) de las diferentes frecuencias y su evolución a través del tiempo (Torrence & Compo, 1998). Luego, se evaluó el espectro cruzado de onditas y la coherencia de onditas durante los mismos periodos de tiempo de cada serie. Se usó la función compleja de Morlet la cual está dada por una onda plana modulada por un filtro Gaussiano:

$$\psi_0(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \cdot e^{i\omega_0 t} \cdot e^{-\frac{\eta^2}{2}},$$

donde,  $\omega_0=6$  es la frecuencia no dimensional, este valor proporciona un buen balance entre tiempo y la ubicación de la frecuencia (Grinsted et al., 2004), y  $\eta$  es un parámetro de tiempo. La transformada continua de las series analizadas ( $X_n$ ) es definida como la convolución de  $X_n$  con un escalar y una transformación en  $\psi_0(\eta)$ :

$$W_n(s) = \sum_{i=0}^{N-1} X_n \psi^* s^{-1}(n' - n)\Delta t,$$

donde  $s$  es el parámetro de escala, el símbolo (\*) es la conjugada compleja, y  $n$  es la ubicación del parámetro. Dicha técnica permite la construcción de un gráfico que representa las variaciones de la amplitud de la señal a través del tiempo (Torrence and Compo, 1998; Hoyos, 1999; Rigozo et al., 2012).

El análisis de espectro cruzado indica si existe una correspondencia detectable de los ciclos entre dos series de tiempo en la misma longitud temporal (Rigozo, 2012). Revelando así las áreas con frecuencias comunes entre las dos series (Grinsted et al., 2004). Dadas dos series de tiempo,  $X$  y  $Y$ , con su respectiva transformación de onditas  $W_n^X(s)$  y  $W_n^Y(s)$ . El espectro cruzado se define como  $W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) \cdot W_n^{Y*}(s)$ . donde  $W_n^{Y*}(s)$  es la conjugada compleja. El espectro cruzado pertenece a los números complejos, por tanto podría definirse como  $|W_n^{XY}(s)|$  (Torrence & Compo, 1998; Hoyos, 1999; Rigozo et al., 2012). Basados en el espectro cruzado, podemos definir la coherencia cuadrada de onditas (también llamada coherencia) como el cuadrado del valor absoluto del espectro cruzado suavizado dividido por el producto del espectro cuadrado de onditas suavizado de las dos series en cuestión (Hoyos, 1999):

$$R_n^2(s) = |s^{-1}W_n^{XY}(s)|^2 \cdot (s^{-1}|W_n^X(s)|^2)^{-1} \cdot (s^{-1}|W_n^Y(s)|^2)^{-1}$$

Dicho análisis se asemeja a una covarianza estandarizada localizada en el tiempo y en la frecuencia. La significancia estadística del análisis de coherencia se estima mediante 5000 simulaciones Monte Carlo (Torrence & Compo, 1998; Grinsted et al, 2004).

#### 4. Resultados

El índice de anillos (IA) de *C. pyriformis* cubre el periodo 1840-2009 ( $n=169$  años) y fue desarrollado con 13 árboles 33 series (Figura 2). El ancho promedio de anillos fue de 1.96mm, la intercorrelación entre cada una de las series de anillos usada para la construcción del IA fue significativa ( $r=0.48$ ,  $P<0.01$ ). La relación señal ruido (SNR), es usada para evaluar la fuerza relativa de la señal común entre series, fue de 11.9 y la señal expresada por la población (EPS) es significativa (0.87), valor aceptable para estudios dendroclimáticos pues supera el valor crítico (0.85) (Wigley et al., 1984; Speers, 2010). Adicionalmente el valor de Gleichläufigkeit fue de 71%.

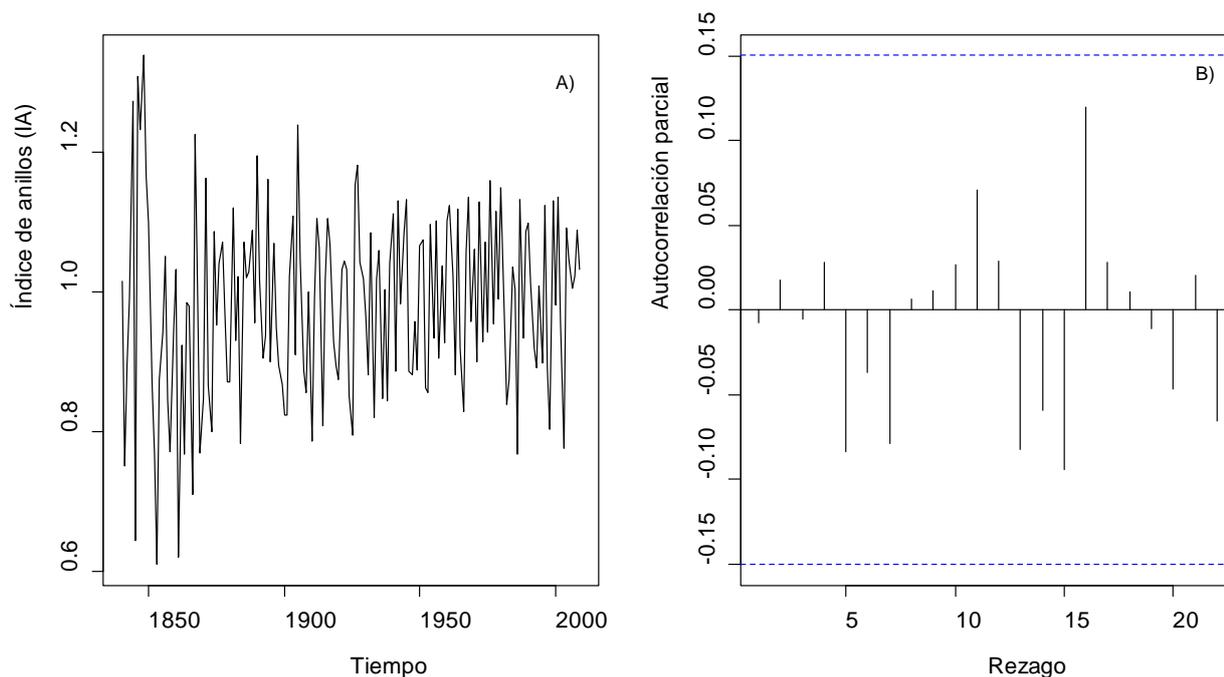


Figura 2. A) Cronología del índice del de anillos (IA), B) Función de autocorrelación parcial del IA.

La variabilidad de la serie es a menudo llamada energía, en el análisis de onditas dicha señal aparece como áreas que hacen referencia a períodos recurrentes de mayor significancia estadística, localizados en diferentes momentos de tiempo. En cada transformada de onditas existe un cono de confianza, el cual indica el punto dónde los períodos empiezan a ser significativos. Estimaciones no significativas e incorrectas pueden tener lugar fuera del cono de confianza, por lo que no deben hacerse interpretaciones en dicha zona. La Figura 3 muestra la transformada de onditas de las series IA, SOI, IS y RCG. En la serie de IA se observan algunos periodos significativos a un nivel de confianza del 95% en las bandas 2-4 años, ocurriendo entre 1840-1850 y 1855-1875. La banda 4-8 años es significativa entre 1920 y 1930 aproximadamente y la banda 8-16 años es significativa entre 1900 y 1915, aproximadamente. La serie SOI, presenta momentos de significancia en el la banda 2-4 años y 4-8 años en los intervalos de tiempo 1875-1890, 1900-1920, 1940-1960, 1970-1990 y en la banda de periodicidad de 8-16 años entre 1970-1990 (Figura 3C).

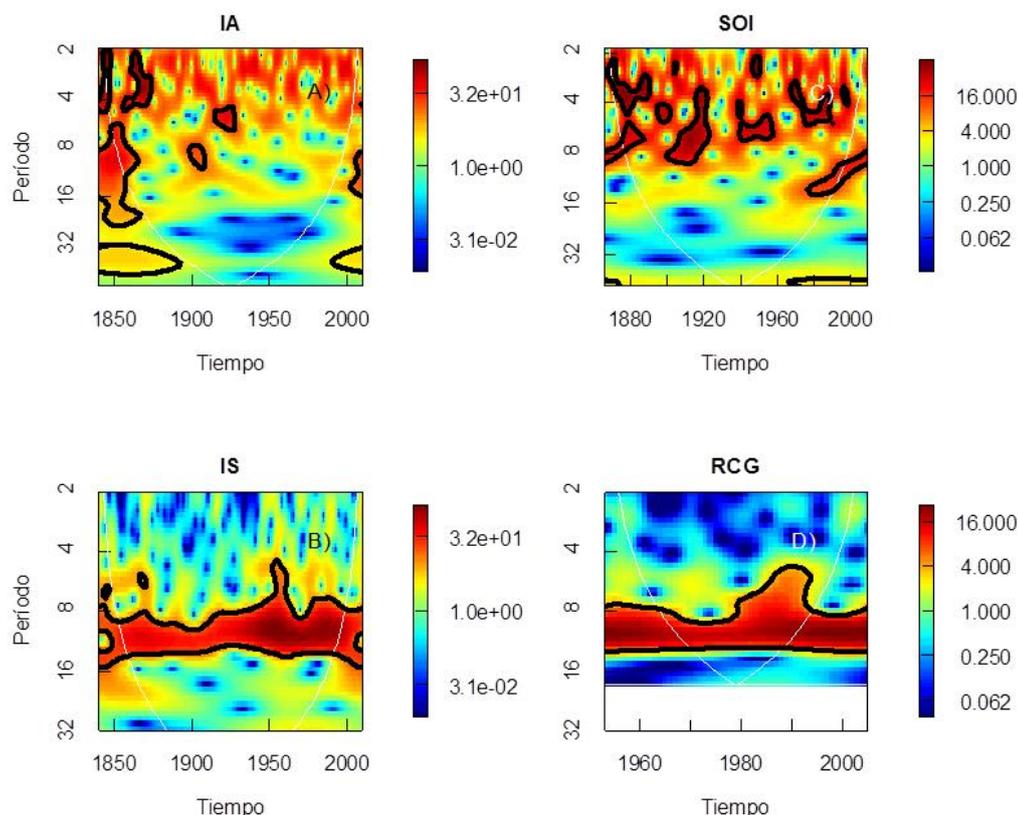


Figura 3. Transformada en onditas (Morlet) de cada una de las series analizadas. EL código en escala de colores indica la variabilidad de la amplitud de la señal. El área de las bandas negras indica un nivel de confianza del 95%. El cono de influencia se muestra como una curva parabólica A) Transformada en onditas del índice de anillos (IA), B) Transformada en onditas de la serie índice de manchas solares (IS), C) Transformada en onditas de la serie Índice de la Oscilación del Sur (SOI), D) Transformada en onditas de la serie Rayos Cósmicos Galácticos (RCG).

La Figura 4 muestra el espectro cruzado de onditas entre IA y las variables ambientales. Pueden notarse algunas bandas de periodicidad significativas en la Figura 4A (IA vs SOI); la banda de 2-4 años aparece esporádicamente en los intervalos 1870-1885, 1905-1915, 1960-1965, y 1998 aproximadamente. La banda de periodicidad 4-8 años es significativa en los intervalos 1890-1930, 1945-1955, 1982-1985, and 1990-2000, aproximadamente. Finalmente, la banda de 8-16 años es significativa en dos intervalos de tiempo: 1890-1915 y 1980-2000. El espectro cruzado entre IA y las variables astronómicas presenta virtualmente una sola banda de periodicidad en común, la banda 8-16 años (alrededor de la periodicidad de 11 años) apareciendo esporádicamente en los intervalos 1850-1875, 1890-1925 y 1940-2000 aproximadamente para la relación IA vs IS (Figura 4B). La relación IA vs RCG presenta periodicidades comunes en la banda de 8-16 años, muy cerca de la periodicidad de años, en el intervalo de tiempo 1955-1995 aproximadamente; y en la banda de 4-6 años entre 1990-2000 (Figura 4C).

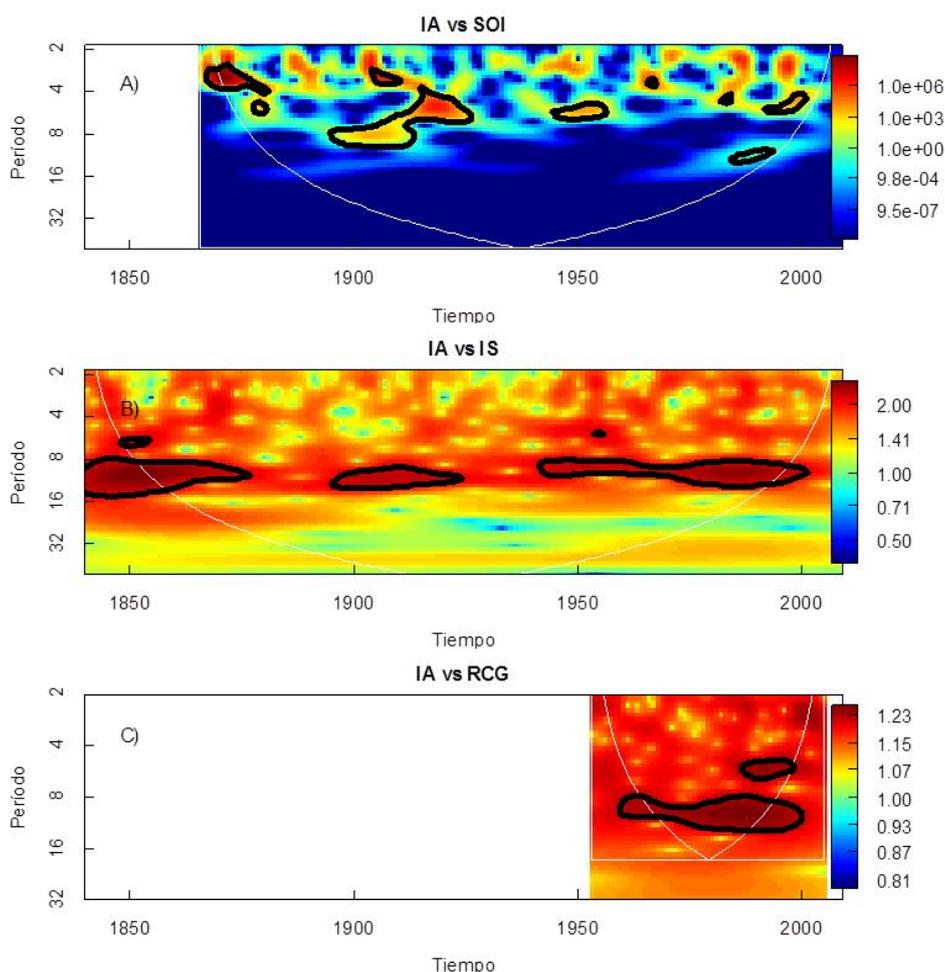


Figura 4. Espectro cruzado de onditas. El área de las bandas negras indica un nivel de confianza del 95%. El cono de influencia se muestra como una curva parabólica A) Espectro cruzado entre índice de anillos (IA) y el Índice de la Oscilación del Sur (SOI), B) Espectro cruzado entre IA y el Índice de manchas solares (IS), C) Espectro cruzado entre IA y los Rayos Cósmicos Galácticos (RCG).

El análisis de coherencia proporciona valiosa información acerca de la fuerza de asociación entre dos señales. Por tanto, el análisis de coherencia es una medida directa de correlación entre el espectro de dos series de tiempo (Chatfield, 1989, Callezes et al., 2008). El análisis de coherencia entre IA y SOI (Figura 5A), presenta intervalos de tiempo significativos (1900-1915, 1983-1985 y 1998 aproximadamente) en la banda de periodicidad de 2-4 años. Así mismo en la banda de periodicidad de 8-16 años durante el intervalo 1975-1990. La coherencia entre IA y SI, muestra la banda 4-8 años el intervalo significativo que va de 1930 a 1955 (Figura 5B), el cual podría estar asociado con el ciclo de Helman de actividad solar (Douglass, 1933). Por su parte, el intervalo de tiempo de 1970-1995, significativo al 95% en la banda 8-16 años, se encuentra presente el análisis de coherencia IA vs IS (Figura 5A) y IA vs RCG (Figura 5C); lo cual indica una “covariación” entre las series durante ese mismo período, donde los valores de coherencia son cercanos a 1 (mayores a 0.8).

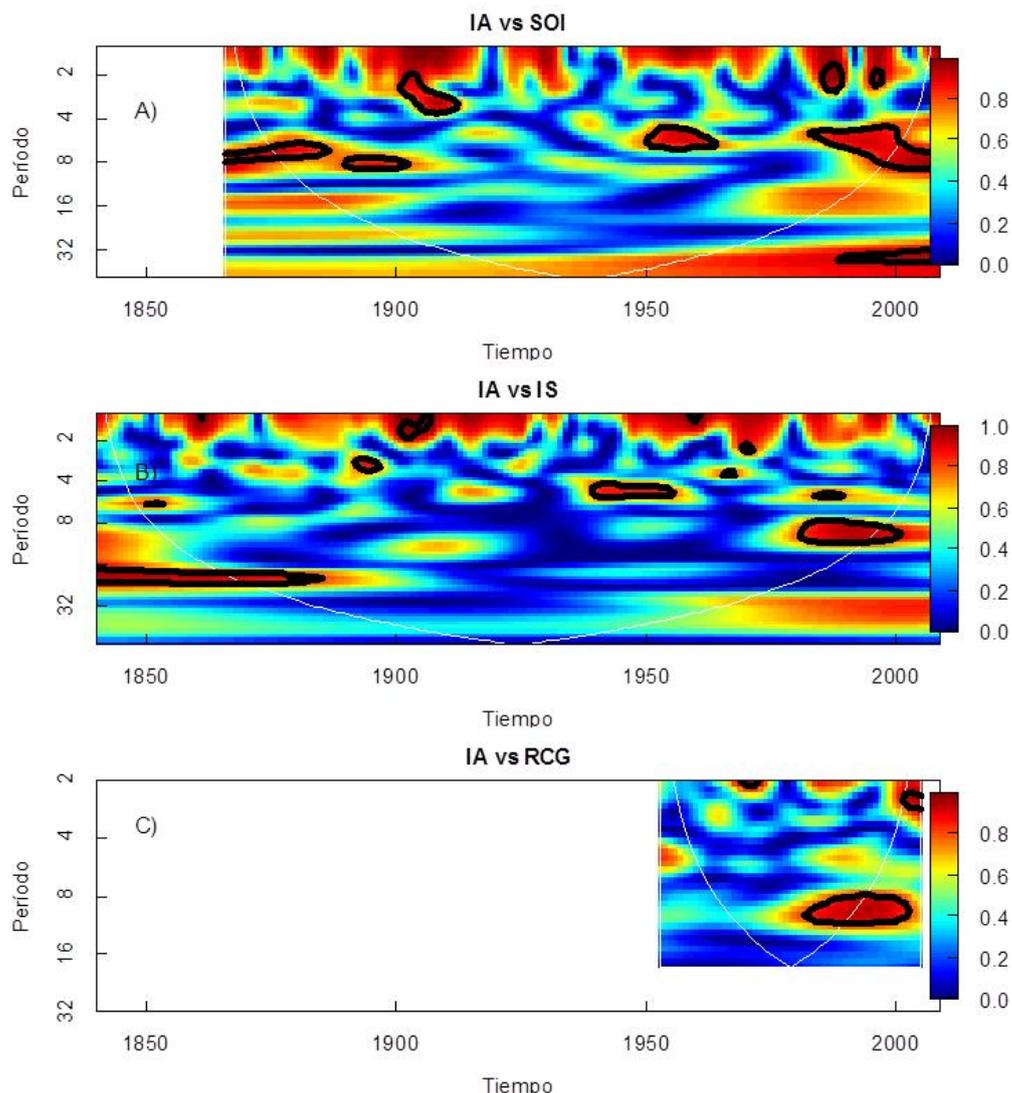


Figura 5. Análisis de coherencia de ondas. El código en escala de colores oscila entre 0 y 1. El área de las bandas negras indica un nivel de confianza del 95%. El cono de influencia se muestra como una curva parabólica. A) coherencia entre índice de anillos (IA) y el Índice de la Oscilación del Sur (SOI), B) Coherencia entre IA y el Índice de manchas solares (IS), C) Coherencia entre IA y los Rayos Cósmicos Galácticos (RCG).

## 5. Discusión

EL análisis de ondas, demuestra la capacidad de los anillos de crecimiento de *C. Pyriformis* para registrar variables globales (SOI) y astronómicas (IS y RCG), señales de media y baja frecuencia respectivamente; lo cual aporta evidencias adicionales a lo reportado con otras especies (Murphy, 1991; Roig et al., 2001; Raspopov et al., 2001; Wang & Zhang et al., 2011; Muraki et al., 2011; Rigozo et al., 2012). Las oscilaciones periódicas de la actividad solar, a menudo se ven reflejadas en algunos parámetros del clima como la temperatura del aire, la temperatura del mar, precipitación, entre otras variables (Bhattacharyya & Narasimha, 2005; Khare & Nigam, 2006; Liu et al., 2013). A su vez, las variaciones del clima afectan el crecimiento de los árboles, y quedan registradas en sus anillos de crecimiento.

El espectro cruzado entre IA y SOI es significativo y demuestra que las periodicidades en las bandas 4-8 años y 8-16 años son continuas y fuertes en el intervalo de 1980 a 1930. En Brasil, Rigozo et al., (2012) usaron la misma técnica con tres especies de árboles: *Araucaria angustifolia*, *Cariniana legalis* y *Parkia sp.* a fin de evaluar la capacidad de estas especies para registrar el la variabilidad solar y del SOI, sus resultados son similares a los nuestros; las periodicidades del espectro cruzado de *A. angustifolia*, se ajustan las mismas bandas y virtualmente en los mismos intervalos de tiempo que los de nuestro análisis. A pesar de que las otras dos especies son tropicales y una de ellas del mismo género que la del presente estudio, el resultado del espectro cruzado con el SOI no es similar al nuestro, quizás debido a que la fenología de las especies puede ser distinta y presentar reacciones individuales al ambiente, independientemente de si están taxonómicamente relacionadas o crecen en ambientes similares.

De acuerdo al espectro cruzado entre IA de *C. pyriformis* y el IS, la especie registra dicha variabilidad, y ambas series se acoplan en la banda de periodicidades 8-16 años, muy cerca del periodo de 11 años, principal ciclo de la actividad solar (Figura 4). En contraste resultados similares han sido obtenidos en otras especies tropicales como *C. legalis*, *Parkia sp.* y *A. niopoides* (Rigozo et al., 2012, Giraldo, 2012) y en especies de árboles que crecen fuera del trópico como *A. angustifolia* y *Abies georgeii* (Nordeman et al., 2005; Rigozo et al., 2012, Wang & Zhang, 2011). Otros investigadores han reportado mediante diferentes métodos el ciclo de 11 años de actividad solar en los anillos de crecimiento de otras especies de árboles (Raspopov et al., 2000, 2004a, 2004b; Roig et al., 2001; Katsakina et al., 2008). En nuestra investigación se muestran relaciones significativas (95% de confianza) para el espectro cruzado entre IA y RCG (Figura 4). Hasta ahora solo existe un estudio sobre este tipo de relación en los trópicos (Giraldo, 2012), el cual presenta resultados similares. Fuera del trópico aparentemente solo existe un estudio llevado a cabo en Reino Unido (Dengel et al., 2009), sin embargo el método aplicado adolece de algunas limitaciones estadísticas.

El análisis de onditas es una técnica usualmente empleada en climatología y geocronología (Torrence & Webster, 1999, Gristed et al., 2004, Souza Echer et al., 2008). Dicho análisis indica si existe una correspondencia detectable de ciclos entre dos señales con la misma longitud temporal, sin embargo, no determina la fuerza de dicha relación entre ambas series. Ante lo cual, un método alternativo es el uso de la coherencia, el cual permite establecer la fuerza de dicha relación entre dos series de tiempo (Velasco & Mendoza, 2008; Giraldo, 2012). No obstante, la mayoría de estudios sólo emplean el espectro cruzado para establecer relación entre dos series de tiempo (Nordeman et al., 2005; Wang & Zhang, 2011; Rigozo et al., 2012). Por su parte, Giraldo (2012), aplica espectro cruzado y coherencia con *A. niopoides* para efectuar comparaciones similares, encontrando alta coherencia entre los anillos de crecimiento y el IS en la banda 8-16 años entre 1970 y 1995. Así mismo encontró relaciones de coherencia alta entre la serie de anillos y los RCG en la banda 8-16 años, entre 1965 y 1995, aproximadamente. Nuestros resultados con el análisis de coherencia entre IA vs IS y IA vs GCR son significativas en la misma banda de periodicidad (8-16 años) en el lapso de tiempo 1970-2000, aproximadamente. Tales hallazgos podrían estar asociados con la gran variabilidad y el aumento de la radiación solar en la región intertropical que condujo a un aumento de  $0,18 \text{ Wm}^{-2} \text{ año}^{-1}$  entre 1983 y 2001 (Pinker et al., 2005).

## 6. Conclusiones

Nuestros resultados proporcionan evidencias claras de la habilidad de un nuevo árbol tropical, capaz de detectar la variabilidad del SOI y variables astronómicas (IS y RCG). La fuertes relaciones de coherencia entre IA, IS y RCG sugieren anomalías de la actividad que pudieron haber modificado el clima en las últimas dos décadas del siglo XX.

## 7. Agradecimientos

Los autores agradecen especialmente al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia (COLCIENCIAS), por la financiación del proyecto "Potencial dendrocronológico

de los árboles de los bosques muy húmedos y pluviales del Chocó Biogeográfico, Colombia” con código 51372. A la dirección de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia (DIME) por la financiación del proyecto con código 3467.

## 8. Bibliografía

Bhattacharyya, S., Narasimha, R., 2005. Possible association between Indian monsoon rainfall and solar activity, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L05813, doi:10.1029/2004GL021044.

Bard, E., Frank, M., 2006. Climate change and solar variability: What's new under the sun? *Earth and Planetary Science Letters*.

Bunn, A., 2008. A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26, 115-124.

Callezes, B., Chavez, M., Berteaux, D., Ménard, F., Vik, J.O., Jenouvrier, S., Stenseth, N.C., 2008. Wavelet analysis of ecological series. *Oecologia*. 156: 287-304.

Chambers, Q. J., Higuchi, N., Schimel, J.P., 1998. Ancient trees in Amazonia. *Nature* 39: 135-136.

Douglass, A.E., 1933, Evidence of cycles in tree-rings records. *P. Natl. Acad. Sci. USA.*, 19, 350-360.

Esper, J., Cook, E.R., Schweingruber, F.H., 2002. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science* 295: 2250-2252.

Enghoff, M.B., Pedersen, J.O.P., Uggerhøj, U.I., Paling, S.M., Svensmark, H., 2007. Aerosol nucleation induced by a high energy particle beam. *Geophysical Research Letters*. L09805, doi:10.1029/2011GL047036.

Fritts, H.C., 1976. *Tree rings and climate*. London. Academic Press, UK.

Fritts H.C., 1991. *Reconstructing large-scale climatic patterns from tree-rings data: A diagnostic analysis*. The University of Arizona Press, Tucson.

Grinsted, A., Moor, J.C., Javrejeva, S., 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Proc. Geoph.*, 11, 561-566.

Gouhier, T.C., Grinsted, A., 2012. biwavelet: Conduct univariate and bivariate wavelet analyses. R package version 0.12. <http://CRAN.R-project.org/package=biwavelet>

Giraldo, J.A., 2012. Anillos, clima y actividad solar. Msc Thesis Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín, Colombia.

Harrison, R.G., Stepheson, D.B., 2006 Empirical evidence for a nonlinear effect of galactic cosmic rays on clouds. *Proceedings of the Royal Society A* 462: 1221-1233.

Hughes, M.K., 2002. Dendrochronology in climatology – the state of the art. *Dendrochronologia* 20: 95-116.

Holdridge, L.R. 1967. Life zone ecology. Tropical Science Center. Costa Rica.

Hoyos, C.D., 1999. Algunas aplicaciones de la transformada de Fourier y la descomposición en ondas a señales hidrológicas y sísmicas. Thesis Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín, Colombia.

IPCC., 2007. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL, 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*. Cambridge University Press. Cambridge, UK & New York, NY, USA.

Kasatkina, E., Shumilov, S., Lukina, N.V., Krapiec, M., Jacoby, G. 2007. Stardust component in tree rings. *Dendrochronologia*, 24, 131-135.

Karam, P.A., 2003 Inconstant Sun: How Solar Evolution Has Affected Cosmic and Ultraviolet Radiation Exposure Over the History of Life on Earth. *Health Physics* 84: 322-333

Khare, N., Nigam, R., 2006. Can the possibility of some linkage of monsoonal precipitation with solar variability be ignored? Indications from foraminiferal proxy records. *Current Science*. 90: 1685-1688.

Kniveton, D.R., (2004) Precipitation, cloud cover and Forbush decreases in galactic cosmic rays. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics* 66: 1135-1142.

Lean, J., Beer, J., Bradley, R., 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters* 22: 3195-3198.

Lisi, C.L., Tomazello-Fo, M., Botosso, P.C., Roig, F.A., Maria, V.R.B., Ferreira, L., Voigt, A.R.A., 2008. Tree-ring formation, radial increment periodicity, and phenology of tree species from a seasonal semi-deciduous forest in Southeast Brazil. *IAWA Journal* 29: 189-207.

Marcott, S.A., Shakun, J.D., Clark, P.U., Mix, A.C., 2013. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11300 year. *Science* 339: 1198-1201.

Marsh, N., Svensmark, H., 2000. Cosmic rays clouds and climate. *Space Sci. Rev.*, 94: 215-230.

Moreno, M.M. & J.I. del Valle. 2015. Influence of local climate and ENSO on the growth of Abarco (*Cariniana pyriformis*) in Chocó, Colombia. *Trees - Struct. Funct.* 29: 97–107.

Murphy, J.O., 1990. Australian Tree ring Chronologies as proxy data for solar variability. *Proc. ASA.*, 8, 292-297.

Murphy, J.O., 1991. The downturn in solar activity during cycles 5 and 6. *Proc. ASA.*, 9, 330-331.

Noderman, D.J.R., Rigozo, N. R., de Faria, H.H., 2005. Solar activity and El-Niño signals observed in Brazil and Chile tree-ring records. *Adv. Space Res.*, 35, 891-896.

Oeschger, H., Beer, J., Andree, M., 1987.  $^{10}\text{Be}$  and  $^{14}\text{C}$  in the Earth system. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A Mathematical and Physics Sciences* 323: 45-55.

Prestes, A., Rigozo, N.R., Nordemann, D.J.R., Wrasse, C. M., Souza, M.P., Echer, E., da Rosa, M.B., Rampelotto, P.H., 2011. Sun-Earth relationship inferred by tree growth rings in conifers from Severiano De Almeida Southern Brazil. *J. Atmos.Sol-Terr. Phy.*, 73, 1587-1593.

Pinker, R.T, Zhang, B., Dutton, E.G., 2005. Do satellites detect trends in surface solar radiation? *Science* 308: 850-854.

R Core Team., 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

Raspopov, O.M., Shumilov, O.I., Kasatkina, E.A., Turemen, E., Lindholm, M., 2000. 35-year climatic Bruckner cycle – solar control of climate variability. *Proc. 1st Solar & Space Weather Euroconference, The solar cycle and Terrestrial Climate. Santa Cruz de Tenerife, Spain.* 25-29.

Raspopov, O.M., Dergachevb, V.A., Kolstro, T., 2004. Periodicity of climate conditions and solar variability derived from dendrochronological and other palaeoclimatic data in high latitudes. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 209: 127-139.

Rigozo, N. R., D.J.R., Nordemann, E., Echer, L.E., Vieira, A., 2004. Search for solar periodicities in tree-ring widths from Concórdia (SC Brazil). *Pure Appl. Geophys.*, 161, 221-233.

Rigozo, N.R., Lisi, S., Tomazello, M., Prestes, A., Nordemann, D.J.R., Souza-Echer, M., Echer, E., Da Silva, H., Rigozo, V.F., 2012. Solar-Terrestrial signal record in tree ring width time series from Brazil. *Pure Appl. Geophys*, DOI 101007/s00024-012-0480-x.

Rind, D., 2002. The Sun's role in climate variations. *Science* 296: 673-677.

Roig, F.A, Le-Quesne, C., Boninsegna, J., Briffa, K.R., Lara, A., Grudd, H., Jones, P.D., Viallagrán, C., 2001. Climate Variability 50,000 years ago in mid-latitude Chile as reconstructed from tree rings. *Nature* 410: 567-570.

Rozelot, J.P., Lefebvre, S., 2006. Advances in understanding elements of the Sun-Earth links, in *Solar and Heliospheric Origins of Space Weather Phenomena* edited by J. P. Rozelot, pp. 5-23. Series: Lectures Notes in Physics, V. 699. Springer, Berlin, Germany.

Svensmark, H., Bondo, T., Svensmark, J., 2009. Cosmic rays decreases affect atmospheric aerosols and clouds. *Geophysical Research Letters* 36: L15101, doi: 10.1029/2009GL038429

Svensmark, S., Pedersen, J.O.P., Marsh, N.D., Enghoff, M.B., Uggerhøj, U.I., 2007. Experimental evidence for the role of ions in particle nucleation under atmospheric conditions. *Proceedings of the Royal Society A* 463: 385-396.

Torrence, C., Compo, G.P., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *B Am. Meteorol. Soc.*, 79, 61-71.

Todd, M.C., Kniveton, D.R., 2004. Short-term variability in satellite-derived cloud cover and galactic cosmic rays: an update. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics* 66: 1205-1211.

Usoskin, I.G., Solanki, S.K., Schüssler, M., Mursula, K., Alanko, K., 2003. Millenium-scale sunspot number reconstruction: Evidence for an unusually active Sun since the 1940s. *Physical Review Letters* 91(21): DOI: 10.1103/PhysRevLett.91.211101

Wang, X., Zhang, Q.B., 2011. Evidence of solar signals in tree rings of Smith fir from Sygera Mountain in Southeast Tibet. *J. Atmos.Sol-Terr. Phy.*, 73, 1959-1966.

Worbes, M., 1999. Annual growth rings rainfall-dependent growth and long-term growth patterns of tropical trees from the Caparo Forest Reserve in Venezuela. *J. Ecol.*, 87, 391-403.

Worbes, M., Junk, W.J., 1999. How old are tropical trees? The persistence of a myth. *IAWA Journal* 20(3): 255-260.